

Max Planck FORSCHUNG



Das Wissenschaftsmagazin der Max-Planck-Gesellschaft 3.2009



FOKUS

Fremde Welten

Streifzüge durch das Sonnensystem

BIOMEDIZIN

Ein einziges Gen
macht Stammzellen

MATERIALFORSCHUNG

Wie Steinchen das
Gleichgewicht halten

KLIMA

Der Boden wurde
unterschätzt

WIRTSCHAFTSGESCHICHTE

Boni gibt es seit
dem 19. Jahrhundert



www.roche-applied-science.com



xCELLigence Real-Time Cell Analyzer System

Discover what you've been missing

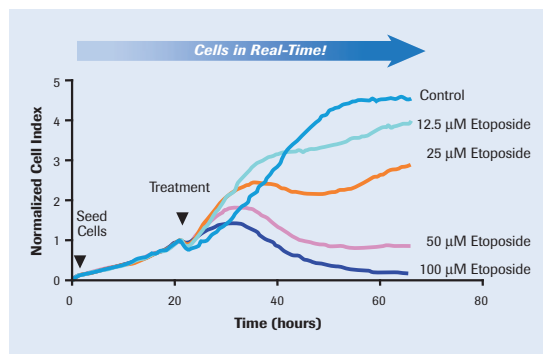


Figure 1: Real-time monitoring of cytotoxicity through DNA damage. Etoposide is a DNA damaging agent which induces apoptosis in high concentrations, while at lower concentrations it leads to S-Phase and/or G2 arrest.

Experience the power of dynamic, Real-Time, non-invasive cellular analysis with the **xCELLigence System** from Roche Applied Science.

Acquire data that end-point analysis could never realize, throughout your entire experiment. Choose between 3×16, 96- or 6×96 well microtiter plate formats.

- **Just add cells:** Obtain physiologically relevant data without labels and reporters.
- **Don't miss any effect:** Capture online data throughout the entire experiment.
- **Maximize versatility:** Detect cells across a broad dynamic range and perform a wide variety of applications. (e.g., proliferation and cytotoxicity, Figure 1)
- **Analyze Cell Migration and Invasion** with a special chamber for the 3×16 well format



For more information, visit www.xcelligence.roche.com or contact your local Roche representative today!



xCELLIGENCE is a trademark of Roche.
© 2009 Roche Diagnostics GmbH. All rights reserved.

Roche Diagnostics GmbH
Roche Applied Science
68298 Mannheim, Germany





Liebe Leserin, lieber Leser,

der Blick zu den Sternen, der Lauf der Planeten durch die Sternbilder, die Bestimmung von Festtagen aus der Lage von Sonne und Sternen über dem Horizont: Diese Phänomene sind – eng mit der Kulturgeschichte der Menschheit verbunden – seit Jahrtausenden Ursache von Spekulation und Wissenschaft. Heute wissen wir, dass unser Sonnensystem Teil der Milchstraße ist, die mit vielen Milliarden weiterer Galaxien das Universum ausmacht. Vor den Weiten des Weltalls erweist sich unsere engere Heimat als sehr klein. Die Sonne als Zentralstern wird von Planeten umkreist, die Monde als Trabanten besitzen. Daneben gibt es Planetoiden und Kometen. Letztere erscheinen als Besucher aus fernen Welten. Erst seit wenigen Jahren wissen wir, woher sie kommen und woraus sie bestehen. Einschläge solcher kosmischer Brocken haben das Schicksal der Erde mitbestimmt und ihre Oberfläche gezeichnet.

Wenn die Erde auf ihrer Bahn Schwärme von Meteoroiden kreuzt, sehen wir sie in klaren Sommernächten als Sternschnuppen. Wir deuten ihr Verglühen als Vorboten glücklicher Ereignisse. Aber der Einschlag großer Asteroiden oder Kometen würde katastrophale Folgen für die Erde haben. Das ist der Kern von Horrorszenarien in dem einen oder anderen Hollywood-Film.

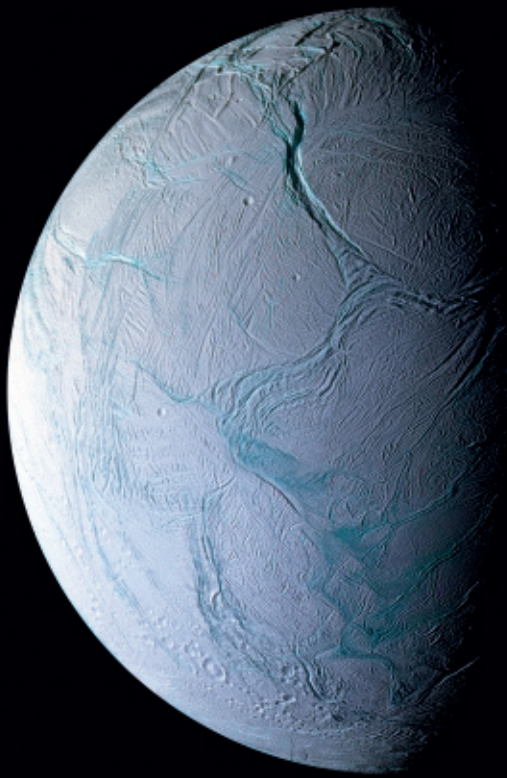
So bedarf es keiner Begründung, dass die Wissenschaft Fragen stellt: Was ist die Struktur, der innere Aufbau und die Stabilität dieser Himmelskörper? Kann man sich ihnen mittels moderner Satelliten- und Raketentechnik nähern und eventuell auf ihnen landen? Man möchte Proben nehmen und ihre Beschaffenheit analysieren, denn sie stammen aus der Zeit, als unser Sonnensystem aus kosmischem Staub entstand. Was lernt man aus der Analyse dieser Objekte über die Entstehung der Erde und ihrer Geschwister? Warum unterscheidet sich die Erde dramatisch von Venus und Mars? Warum gibt es auf der Erde Wasser und eine Atmosphäre, die Entstehen und Evolution von Leben erlauben? Ist nur die Erde Träger von Leben in unserem Sonnensystem und wenn ja, unter welchen Umständen ist es entstanden?

Solche Fragen sind schon vor langer Zeit gestellt und spekulativ beantwortet worden. Und so ist es vielmehr der Wunsch nach konkreten Daten und Fakten, der die hohen Kosten rechtfertigt, um jenseits aller Spekulation die wahre Natur unseres Sonnensystems aufzuklären. Die Missionen zu anderen Planeten und deren Monden lassen sich nur im Rahmen internationaler Kooperationen finanzieren. Die Kosten übersteigen die Möglichkeiten nationaler Forschungsorganisationen bei Weitem.

Die Max-Planck-Gesellschaft hat sich seit Jahrzehnten verpflichtet, von deutscher Seite als Partner multinationaler Projekte tätig zu werden. Sie koordiniert mit ihren Instituten auch die Beteiligung deutscher Hochschulen an großen interplanetaren Missionen. Im Fokus dieser Ausgabe der MAXPLANCKFORSCHUNG gewinnen Sie Einblick in das eine oder andere spannende Projekt: die Suche nach Wasser auf dem Mars oder dem Saturnmond Enceladus, die Erkundung der stürmischen Venusatmosphäre oder Studien an Kleinplaneten und Kometen.

Interplanetare Missionen sind langwierig. Für Planung und Konstruktion der Instrumente benötigt man bis zu zehn Jahre. Der Flug zu den Zielobjekten dauert oftmals noch einmal viele Jahre. Dann folgen Sammlung und Auswertung der Daten. In der Summe erfordert die erfolgreiche Bewältigung einer Mission eine stabile, auf langfristige Ziele ausgerichtete Forschungsorganisation, wie sie im deutschen Umfeld die Max-Planck-Gesellschaft garantiert. Sie gilt daher als verlässlicher Partner im internationalen Wettbewerb um die Teilnahme an der Exploration des Sonnensystems. Das öffentliche Interesse an den Ergebnissen solcher Missionen rechtfertigt die nötigen Mittel und Anstrengungen.

Gerhard Wegner
Emeritierter Direktor am Max-Planck-Institut
für Polymerforschung



Inhalt



48 Modellsand: Mit verschiedenen großen Körnern lässt sich simulieren, was natürlichen Sand zusammenhält.

16 FOKUS

Fremde Welten

16 Die Suche nach dem Lebenselixier

Wo Wasser ist, kann es Leben geben. Diese Erkenntnis motiviert die Wissenschaftler, im Planetensystem danach zu suchen.

26 Die Gluthölle hinter dem Schleier

Die europäische Raumsonde *Venus Express* hat ein bizarres Inferno im Visier, geprägt von gewaltigen Wirbelstürmen und großer Hitze.

34 Zeugen kosmischer Heimatkunde

„Die im Dunkeln sieht man nicht“, heißt es bei Bert Brecht. Das trifft auch auf Kleinkörper wie Kometen und Planetoiden zu. Gleichwohl spielen sie eine wichtige Rolle.

PERSPEKTIVEN

- 06** Wolken – ein Quell für Klimaforscher
- 06** Astrocenter in China
- 07** Chemie-Nobelpreis für Ada E. Yonath
- 07** Navigieren im Ozean der Moleküle
- 08** Ein Anschlag auf die Wissenschaft
- 09** Ins Netz gegangen

ZUR SACHE

10 **Das Alter – für die Politik kein Kinderspiel**

Die zukünftige Altersstruktur in unserem Land beeinflusst die Sozialpolitik ganz erheblich.

FOKUS

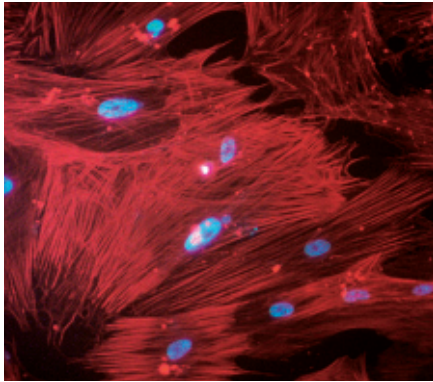
- 16** Die Suche nach dem Lebenselixier
- 26** Die Gluthölle hinter dem Schleier
- 34** Zeugen kosmischer Heimatkunde

ZUM TITEL: Kein Abdruck im Sand, sondern der 800 Meter breite Victoria-Krater in der Region Meridiani Planum auf dem Mars. Der Rote Planet gilt als erste Adresse, wenn Wissenschaftler außerhalb der Erde nach Wasser fahnden.



TECHMAX

Zurück zum Urknall – wie Teilchenphysiker mit dem LHC auf Zeitreise gehen



56 Muskelzellen: Sie entstanden aus neuronalen Stammzellen, die ein einziges Gen pluripotent machte.



64 Musiktalent: Dierk Raabe studierte erst Waldhorn, ehe er sich der Metallforschung verschrieb.



80 Marschgepäck: Klimaforscher schaffen ihre Instrumente ins Gelände, um Bodenproben zu nehmen.

SPEKTRUM

- 42 Gene für die Reisvielfalt
- 42 Üble Haare an der Wurzel gepackt
- 43 Formelsprache, schwere Sprache
- 43 Der Lohn der Großzügigen
- 43 Ein Himmel voller Pilze
- 44 Volle Sicht mit einer Hirnhälfte
- 44 Fledermäuse sehen bunt
- 44 Falter mit schwerem Gepäck
- 45 Ein Pulver gegen Energieverschwendung
- 45 Moleküle in der Mikrofalle
- 45 Ein Gigant in Aufruhr
- 46 Vulkanwolke vom Winde verweht
- 46 Gefräßige Andromeda
- 46 Mit den Haien kam der Thymus
- 47 Schalter für Aderwachstum
- 47 Eine Störung, mit der zu rechnen ist

PHYSIK & ASTRONOMIE

- 48 **Brücken, die Sand verbinden**
Was hält eine Sandburg im Innersten zusammen? Forscher untersuchen solch komplexe Gebilde.

BIOLOGIE & MEDIZIN

- 56 **Potenzmittel für Zellen**
Mit einem einzigen Faktor aus adulten Stammzellen des Gehirns lassen sich wahre Alleskönner für die regenerative Medizin züchten.

MATERIE & MATERIAL

- 64 **Grenzgänger zwischen metallischen Dimensionen**
Zur Person: Dierk Raabe
- 72 **Gleichgewicht auf Staub gebaut**
Sie heißen Otoconien – winzige Kristalle, die im Gleichgewichtsorgan für Balance sorgen. Ein guter Grund, die Steinchen im Detail zu untersuchen.

UMWELT & KLIMA

- 80 **Klima, das im Boden steckt**
Mit dem Begriff Klima bringt man meist die Atmosphäre in Verbindung. Doch auch im Boden laufen bedeutende Prozesse ab, die in den Modellen bisher vernachlässigt wurden.

KULTUR & GESELLSCHAFT

- 88 **Machen Boni Beine?**
Anreize für Manager gab es schon im 19. Jahrhundert. Aber für die Unternehmen erweisen sie sich nicht unbedingt als lohnende Investition.

RUBRIKEN

- 03 **Editorial**
- 96 **Rückblende**
96 Schwitzen im Dienst der Wissenschaft
- 99 **Neu erschienen**
99 Archiv der Max-Planck-Gesellschaft (Hg.), Max Planck und die Max-Planck-Gesellschaft
- 100 Michael Tomasello, Die Ursprünge der menschlichen Kommunikation
- 101 Ralf Jaumann/Ulrich Köhler, Der Mond
- 102 Thomas Bührke, Warum Planeten keine Würfel sind
- 103 **Standorte**
- 103 **Impressum**

Wolken – ein Quell für Klimaforscher

Was läuft innerhalb von Wolken ab? Wie verändern sie sich unter wechselnden Umweltbedingungen? In den modellgestützten Voraussagen über das zukünftige Klima bleiben Wolken der Unsicherheitsfaktor. Das wollen Forscher des Max-Planck-Instituts für Meteorologie jetzt ändern – und starten in den nächsten Monaten auf der Karibikinsel Barbados eine zweijährige empirische Feldstudie. Die Wissenschaftler konzentrieren sich dabei auf das Wechselspiel zwischen Aerosolen, Wolken, Niederschlag und Klima. Wodurch wird die Verteilung und Struktur von Wolken in der Passatregion gesteuert und wie reagieren sie auf sich ändernde Umweltbedingungen? So lautet die zentrale Frage, die das Projekt klären soll.

In enger Zusammenarbeit mit dem Caribbean Institute for Meteorology and Hydrology werden die Max-Planck-Forscher neueste Fernerkundungsinstrumente – wie Lidar und Wolkenradar – an einem windseitigen Steilufer der Insel installieren. Dazu kommen Analysen von Satellitendaten sowie Messungen des Forschungsflugzeugs *HALO*.

Auf Barbados sind die Bedingungen für die Messungen ideal. Die Insel liegt in der Karibik relativ weit östlich und die Anströmung durch die Passate wird durch keine anderen Landmassen gestört. Auf Barbados gibt es je nach Jahreszeit unterschiedlichste Strömungsmuster oder Wolkenformationen. Im Winter und frühen Frühling dominieren Passatwinde mit zeitweiligem menschlichen Einfluss durch die Verbrennung von Biomasse. Im Frühsommer wird Mineralstaub aus der Sahara transportiert, während im Spätsommer tropische Konvektionsausbrüche das Bild bestimmen. Die einzigartig lange Messreihe von Staub- und Aerosolkonzentrationen durch Wissenschaftler der Universität Miami macht den Messort zusätzlich attraktiv.



Wissenschaft in Traumlage: Auf der Karibikinsel Barbados wollen Forscher in einer Feldstudie den Einfluss von Wolken auf das Klima untersuchen.

Die Feldstudie bietet die Möglichkeit, durch Bodenmessungen sehr viele Daten zu gewinnen, die wiederum dazu dienen, die Beziehungen zwischen Wolkenbedeckung und Niederschlag sowie umgebende meteorologische Bedingungen wie Feuchte, Aerosolzusammensetzung und -konzentration zu erforschen. Mithilfe dieser Datenbasis lassen sich Ergebnisse früherer Feldkampagnen verallgemeinern und Daten der neuen Generation von Sensoren auf Fernerkundungssatelliten bedeutend besser interpretieren. Die Leistungsfähigkeit des neuen deutschen Forschungsflugzeugs *HALO* bietet zudem die Möglichkeit, lokale Messungen mit der Gesamtstruktur der Passatwinde zu verbinden.

Foto: MPI für Meteorologie

Astrocenter in China

Die langjährige erfolgreiche Zusammenarbeit von Max-Planck-Astronomen und ihren Kollegen von der Chinesischen Akademie der Wissenschaften erreicht eine neue Dimension: An der renommierten University of Science & Technology in Hefei wird ein Max Planck China Center for Cosmology and Astrophysics eingerichtet, das außerdem eng mit einer Graduate School

verbunden ist. Die Forscher widmen sich unter anderem der Entstehung und Entwicklung von Galaxien, supermassiven schwarzen Löchern, Gammabursts, der Dunklen Materie und der Dunklen Energie. Dabei wollen sie mit Computersimulationen ebenso arbeiten wie mit statistischen Methoden zur Analyse von Beobachtungsdaten. An der Graduate School werden Max-

Planck-Wissenschaftler als Gastdozenten unterrichten. Dieses neue Instrument der internationalen Kooperation versteht sich als institutsübergreifende Initiative unter Federführung des Max-Planck-Instituts für Astrophysik; an dem Projekt beteiligen sich außerdem die Institute für Astronomie, Radioastronomie und extraterrestrische Physik. Das neue Center startet im Januar 2010.

Chemie-Nobelpreis für Ada E. Yonath

„Es freut mich, dass mit Frau Yonath eine Wissenschaftlerin geehrt wurde, die mehr als 20 Jahre der Max-Planck-Gesellschaft verbunden war. Während dieser Zeit entstanden die entscheidenden Grundlagen der Forschung, für die sie jetzt den Nobelpreis erhielt“, sagte Präsident Peter Gruss, als er von der Auszeichnung für Ada E. Yonath erfuhr.

Die Forscherin arbeitete von 1979 bis 1984 unter der Leitung von Heinz-Günter Wittmann in der Abteilung Ribosomen und Proteinbiosynthese am Max-Planck-Institut für molekulare Genetik in Berlin. In dieser Zeit begann sie an Struktur und Funktion der Ribosomen zu forschen. Von 1986 bis 2004 leitete sie zudem die Max-Planck-Arbeitsgruppe Ribosomenstruktur am Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY) in Hamburg. Ada E. Yonath forscht heute am Weizmann-Institut für Wissenschaften in Rehovot, Israel. Sie teilt sich den Nobelpreis mit Ven-

katraman Ramakrishnan (MRC Laboratory of Molecular Biology, Cambridge, England) und Thomas A. Steitz (Yale University, USA).

Ribosomen sind die Eiweißfabriken der Zellen. Darin werden nach einem bestimmten Plan lebensnotwendige Proteine produziert. Vor mehr als 20 Jahren fasste Ada E. Yonath den Plan, Struktur und Funktion der Ribosomen mithilfe von kristallografischen Techniken zu entschlüsseln. Auf diesem Gebiet war sie eine Pionierin und musste die passenden Methoden erst entwickeln. Der Durchbruch kam 1995: Zwar gab es schon Aufnahmen der Ribosomen. Aber Yonath gelang es, durch das Einschleusen von „Hinweisschildern“ – sie markierte bestimmte Stellen in der ribosomalen Untereinheit mit Iridiumbeziehungsweise Quecksilberverbindungen – die Daten und Bilder wirklich lesbar und damit aussagekräftig zu machen. Damit stieß sie die Tür zur Erforschung der zellulären Fabriken weit auf.



Ausgezeichnete Wissenschaftlerin: Ada E. Yonath erhält den Nobelpreis für Chemie 2009.

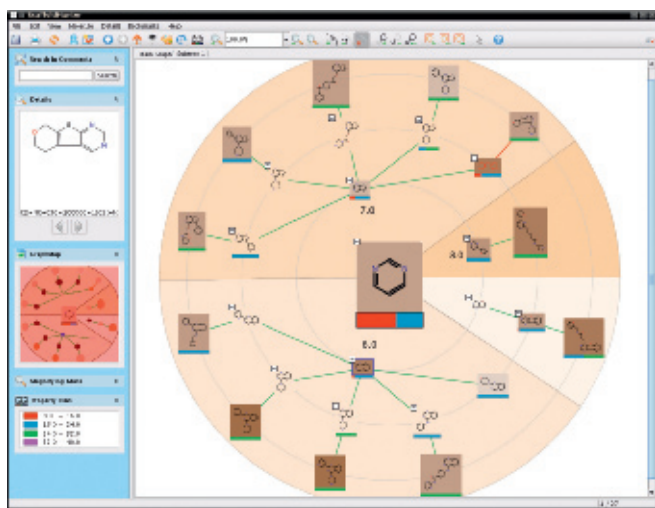
Navigieren im Ozean der Moleküle

Neue Wirkstoffe gegen Krebs oder Malaria aufzuspüren, könnte schon bald einfacher werden – dank eines Computerprogramms, mit dem Forscher des Max-Planck-Instituts für molekulare Physiologie und ihre Kollegen von den Universitäten Frankfurt und Eindhoven sowie der University of

New Mexiko in den USA die Suche nach geeigneten Substanzen erleichtern: einem Programm namens *Scaffold Hunter* (*scaffold* bedeutet im Englischen „Grundgerüst“, *hunter* ist der „Jäger“).

Der chemische Strukturraum enthält schätzungsweise bis zu 10^{160} unterschiedliche Moleküle. Doch nur ein Teil davon, vielleicht 10^{60} Moleküle, eignet sich möglicherweise als Wirkstoffe. Diese Inseln biologischer Aktivität im Ozean aller potenziellen Verbindungen ausfindig zu machen, gestaltet sich schwierig. Das neue Navigationssystem erzeugt nach strukturellen Kriterien eine Karte des chemischen Strukturraums und nutzt sie, um biologisch aktive Verbindungen aufzufinden. *Scaffold Hunter* eignet sich auch, um neue Wirkstoffkandidaten vorauszusagen, die in der Natur nicht vorkommen.

Die Wissenschaftler betrachten jenen medizinisch besonders relevanten Ausschnitt des chemischen Strukturraums, in dem die Moleküle ringförmige Strukturen enthalten. Dabei reduzieren sie die Moleküle jeweils auf ihr charakteristisches Grundgerüst. Diese Strukturen ordnet der *Scaffold Hunter* nach ihrer Ähnlichkeit in einer Art Stammbaum: Das Programm weist jedem Gerüst übergeordnete kleinere Gerüste zu, indem es nach und nach Ringe entfernt. Das ergibt unzählige „Eltern-Kind-Beziehungen“ – strukturell verwandte Moleküle unterschiedlicher Komplexität. Der Clou: Chemisch ähnliche Verbindungen zeigen sehr wahrscheinlich auch ähnliche biologische Aktivität.



Wirkstoffsuche im Baum der Strukturen: Das Programm *Scaffold Hunter* weist den Weg zu neuen Wirkstoffkandidaten.

Ein Anschlag auf die Wissenschaft

Im Juli dieses Jahres wurde die junge Ägypterin Marwa El-Sherbini im Landgericht Dresden erstochen und ihr Mann Elwi Ali Okaz, Doktorand am Max-Planck-Institut für molekulare Zellbiologie und Genetik, bei dem vergeblichen Versuch, ihr zu Hilfe zu kommen, schwer verletzt. Die Max-Planck-Gesellschaft hat auf diesen Akt von Fremdenfeindlichkeit mit großer Bestürzung reagiert. Unser ganzes Mitgefühl gilt nach wie vor der Familie, insbesondere dem dreijährigen Sohn, der im Gerichtssaal anwesend war.

Der Dresdner Mord hat zu einem Schärfen der Sinne geführt. Manche ausländische Wissenschaftlerin, mancher ausländische Wissenschaftler überwindet seine Scheu und spricht – mitunter erstmals – über Ressentiments im Alltag. In den Instituten wachsen Achtsamkeit und Sensibilität für die Diskriminierung von Ausländern, sei es bei der Wohnungssuche, sei es gegenüber den Ausländerbehörden.

Wie keine andere deutsche Wissenschaftsorganisation ist die Max-Planck-Gesellschaft international vernetzt: Ein Drittel aller Direktoren hat einen ausländischen Pass, 80 Prozent der Postdoktoranden und fast die Hälfte der Doktoranden stammen aus dem Ausland, etwa aus China, Indien, Russland, Süd- und Mittelamerika, Italien, den USA, Frankreich oder Polen. In den Labors und Bibliotheken an unseren Instituten wird interkulturelles Arbeiten Tag für Tag sehr erfolgreich praktiziert.

Und hierfür haben wir in den vergangenen Jahren einiges getan. Unsere Gästebetreuer leisten ebenso einfühlsame und gute Arbeit wie die an einigen Instituten schon bestehenden *International Offices*, die bei der Suche nach einer geeigneten Schule, Wohnung und

einem Sprachkurs ebenso helfen wie beim Eröffnen eines Bankkontos oder bei Integrationsproblemen. Und doch müssen wir uns eingestehen, dass es nicht ausreicht, einer globalen Forschungselite optimale Arbeitsbedingungen und Stipendienmöglichkeiten zu bieten.

Jonathan Howard, der aus Australien stammende Direktor am Max-Planck-Institut für molekulare Zellbiologie und Genetik, bestätigt, dass Sachsen kein schlechtes Image in der Welt hat und dass das Institut unter jungen Wissenschaftlern damit wirbt, dass sie hier in Dresden leben und arbeiten dürfen. Aber dass seine aus China, Indien und Skandinavien stammenden Mitarbeiter während des Landtagswahlkampfes täglich an Dut-

LAMENTS nachzulesen war.

Doch auch in Westdeutschland begegnet uns Ausländerfeindlichkeit, oft in Form von Alltagsrassismus: Der dunkelhäutige Inder mit Familie in Hamburg findet ebenso schwer eine Wohnung wie der muslimische Single in Stuttgart; in Heidelberg wurde ein Mitarbeiter mit schwarzafrikanischem Hintergrund von alkoholisierten Jugendlichen angegriffen. Bislang haben unsere Institute auf derartige Vorfälle individuell reagiert. Der Vorfall in Dresden hat uns veranlasst, diese Position neu zu überdenken. Mitte August fand deshalb ein erster Austausch zur aktuellen Situation ausländischer Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler an den Max-Planck-Standorten statt, der die Brisanz deutlich machte.



Blumen zum Gedenken an Marwa El-Sherbini. Die junge Ägypterin war im Landgericht Dresden erstochen worden.

zenden NPD-Plakaten vorbeimussten, die zum Hass auf Ausländer aufforderten, hat ihn aufgebracht. Er und seine Kollegen haben sich daher an den sächsischen Landtag gewandt.

Wir dürfen nicht die Augen davor verschließen, dass Xenophobie zum negativen Standortfaktor in Deutschland wird. Laut einer neueren Studie der Universität Halle-Wittenberg wird es in Regionen wie Thüringen, Brandenburg und Sachsen tatsächlich zunehmend schwerer, ausländische Fachkräfte zu gewinnen. Fremdenfeindlichkeit ist indes kein ostdeutsches Phänomen.

Dennoch zeigen diverse Studien, dass Ostdeutsche sich gegenüber Westdeutschen 20 Jahre nach der Wende noch immer erheblich benachteiligt fühlen und Fremdenfeindlichkeit, Islamophobie und rassistische Einstellungen hier deshalb weiter verbreitet sind als in den alten Bundesländern, wie in der Juli-Ausgabe 2009 des PAR-

Künftig werden wir an den Instituten mehr tun müssen, damit sich unsere ausländischen Gäste auch außerhalb der Max-Planck-Institute wohlfühlen. Eine vermehrte Einrichtung von *International Offices* ist dabei ebenso zu überlegen wie Willkommenspakete, ein interkulturelles Training und eine weitere Professionalisierung der Gästebetreuer. Dem gegenseitigen Verständnis wird es auch nützen, wenn ausländische Wissenschaftler, die länger in Deutschland bleiben wollen, die Landessprache sprechen und die kulturellen Eigenarten der Deutschen kennen. Hierzu wollen wir mit *Welcome Days* beitragen. Auch auf Stadt-, Länder- und Bundesebene wollen wir – gerne auch mit anderen Wissenschaftsorganisationen – aktiv werden.

Der Respekt vor der Kultur der anderen, die Toleranz für die Religion der anderen und die Achtung vor der Hautfarbe der anderen sind für uns Grundbedingungen für ein gemeinsames Arbeiten und Forschen, für die wir uns nachhaltig einsetzen werden. Nicht zuletzt aufgrund unserer Geschichte schaut die Weltöffentlichkeit mit einem besonders geschärften und sensiblen Blick darauf, wie Ausländer in Deutschland behandelt werden. Dass Deutschland ein weltoffenes und gastfreundliches Land ist, konnten wir bei der im eigenen Land ausgetragenen Fußball-Weltmeisterschaft vor drei Jahren überzeugend unter Beweis stellen. Es wäre schön, wenn wir daran wieder anknüpfen könnten.



Peter Gruss,
Präsident der Max-Planck-Gesellschaft

Ins Netz gegangen



Zeitreisen durchs Klima

Ist Klimawandel lediglich ein modernes Phänomen oder hat es ihn in der Erdgeschichte schon immer gegeben? Wie groß ist der Einfluss des Menschen auf das Klima? In einer Veranstaltungsreihe des Max-Planck-Instituts für Chemie und des Forschungszentrums Erdsystemwissenschaft der Johannes Gutenberg-Universität (Geocycles) Mainz stellen sich zwölf Wissenschaftler der Diskussion. So spricht Tillman Spohn vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt darüber, wie sich auf der Erde ein lebensfreundliches Klima entwickeln konnte. Neben der Rolle von Sonne und Aerosolen stehen auch die Risiken der Erderwärmung auf dem Programm, ebenso die Frage: „Können wir den Klimawandel stoppen?“ Dabei erläutert Marc Laurence vom Max-Planck-Institut für Chemie die Chancen und Risiken von Geoengineering – einem Forschungsgebiet, das durch gezielte Eingriffe in die Umwelt die katastrophale Klimaänderung zu stoppen versucht. Die Website der Veranstalter bietet einen Überblick über die Veranstaltungsreihe und die Möglichkeit, sich die Vorträge als Video anzusehen.

<http://www.klimazeitreise.de>

Forschung live

Das Zentrum Neue Technologien (ZNT) im Deutschen Museum bietet von November an eine einzigartige Plattform für aktuelle Themen aus Naturwissenschaft und Technik, an der sich auch die Max-Planck-Gesellschaft beteiligt. Um eine gut 600 Quadratmeter große, dauerhaft eingerichtete Kernaussstellung

zur Nano- und Biotechnologie gruppieren sich temporäre Themeninseln zu aktuellen Fragen, Präsentationen der Partner aus Industrie und Wissenschaft, ein Veranstaltungsforum sowie zwei große Flächen für Sonderausstellungen. Unter dem Motto „Gläserne Wissenschaft“ können Besucher in verschiedenen Laborbereichen nicht nur selbst Experimente durchführen, sondern auch Forschern bei ihrer Arbeit live über die Schulter schauen. Einen Vorgeschmack bietet die Internetseite

<http://www.deutsches-museum.de/ausstellungen/neue-technologien>

Wahl-Blog

Promovierende, die an Hochschul- und Wissenschaftspolitik interessiert sind, finden nur wenig in den Regierungsprogrammen der Parteien. Dabei stellen sie eine große Gruppe an Universitäten und außeruniversitären Forschungseinrichtungen. Grund genug für das Phdnet der Max-Planck-Gesellschaft, einmal nachzuhaken. Gemeinsam mit den Helmholtz Juniors und dem Doktorandennetzwerk Thesis sandten sie vor der Bundestagswahl einen ganzen Fragenkatalog an SPD, CDU, FDP, Grüne und Linke und baten um Auskunft zu den vier Themenkomplexen „Wissenschaft als Beruf“, „Wissenschaft in der Gesellschaft“, „Doktorandenausbildung“ und „Wissenschaftskommunikation“. Nach der Bundestagswahl müssen sich die Parteien an ihren Versprechen messen lassen. Die Parteienantworten und die Diskussion darüber zum Nachlesen unter <http://jrresearchersgermany.wordpress.com/>

Das Alter – für die Politik kein Kinderspiel

Steigende Lebenserwartung auf der einen Seite, niedrige Geburtenraten auf der anderen – welche Auswirkungen der demografische Wandel auf die Gesellschaft haben wird, hat sich inzwischen weitgehend herumgesprochen. Weitaus weniger bekannt sind jedoch die Folgen einer solchen Altersstruktur für sozialpolitische Entscheidungen.

TEXT HARALD WILKOSEWSKI

Vor der Wahl ist nach der Wahl. Das gilt insbesondere für die großen Themen unserer Zeit, mit denen sich deutsche Politiker auseinandersetzen müssen. Neben den beiden anderen Megatrends Klimawandel und Globalisierung ist dies vor allem der demografische Wandel. Die Auswirkungen einer weiterhin schnell steigenden Lebenserwartung, nachhaltig niedriger Geburtenraten und sich ändernder Familienstrukturen werden die Agenda auch der neuen Regierung vor zentrale Herausforderungen stellen – und zwar sowohl in strategischer als auch in inhaltlicher Hinsicht.

Strategisch stellt sich etwa die Frage, welche grundlegenden politischen Herangehensweisen Erfolg versprechend sind: Sollte man versuchen, die Be-

Momentane Rekordhalter sind die japanischen Frauen mit einer Lebenserwartung von 86 Jahren.

völkerungsentwicklung direkt zu beeinflussen, oder abwarten, bis sich die demografischen Prozesse auf natürliche Weise einpendeln?

Was konkrete Politikinhalt angeht, stehen die Auswirkungen in einzelnen Bereichen des Sozialsystems im Mittelpunkt, so bei den Themen Rente oder Gesundheit. Obwohl der demografische Wandel als

Schlagwort mittlerweile in den meisten Köpfen der Republik angekommen ist, erscheint es sinnvoll, sich zunächst noch einmal die wesentlichen Eckdaten der tief greifenden Veränderungsprozesse innerhalb der deutschen Bevölkerung anzusehen.

Die internationale Rekordlebenserwartung ist seit dem Jahr 1840 mit bemerkenswerter Regelmäßigkeit um 2,5 Jahre pro Dekade gestiegen. Anschaulicher ausgedrückt bedeutet dies, dass man pro Lebensjahr drei Monate als „Bonus“ hinzubekommt. Die momentanen Rekordhalter sind die japanischen Frauen mit einer Lebenserwartung von 86 Jahren. Die Entwicklung in der Bundesrepublik verläuft seit Ende des Zweiten Weltkriegs mit nur geringem Abstand parallel zum internationalen Trend; deutsche Frauen können eine durchschnittliche Lebensspanne von mehr als 82 Jahren erwarten.

Diese Entwicklung liegt vor allem am medizinischen Fortschritt, an Verbesserungen der hygienischen Verhältnisse sowie an der Ernährungslage, die zunächst die hohe Säuglingssterblichkeit auf ein heute äußerst niedriges Niveau drastisch verringert haben. Jeder weitere Anstieg der Lebenserwartung ist deshalb auf eine Reduzierung der Sterblichkeit höherer Altersgruppen zurückzuführen.

Wie stark sich die sogenannte fernere Lebenserwartung sogar unter den Hochbetagten durch eine Verbesserung ihrer Lebensverhältnisse beeinflussen lässt, zeigt das Beispiel der deutschen Vereinigung. Bereits wenige Jahre nach dem Systemwechsel, der das Niveau der medizinischen und sonstigen Versor-

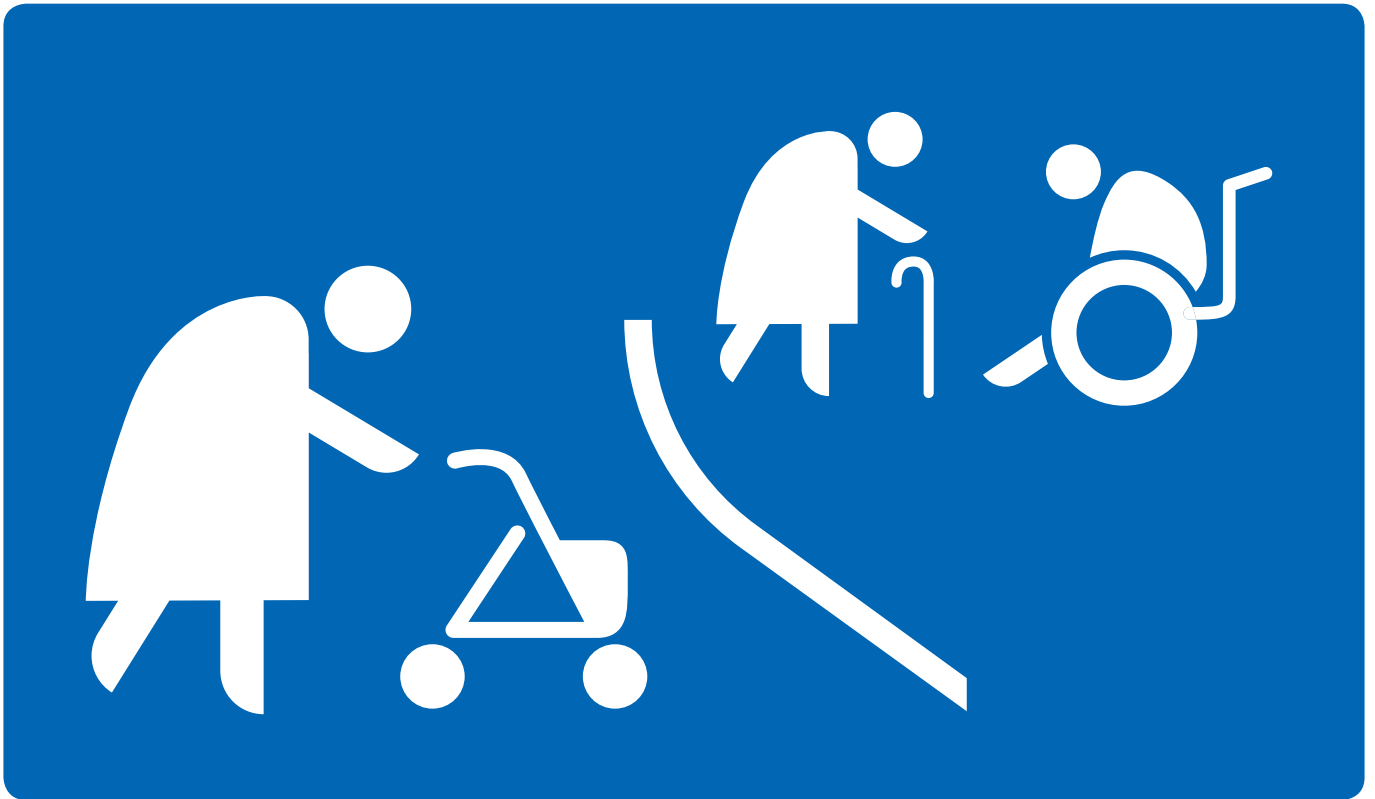
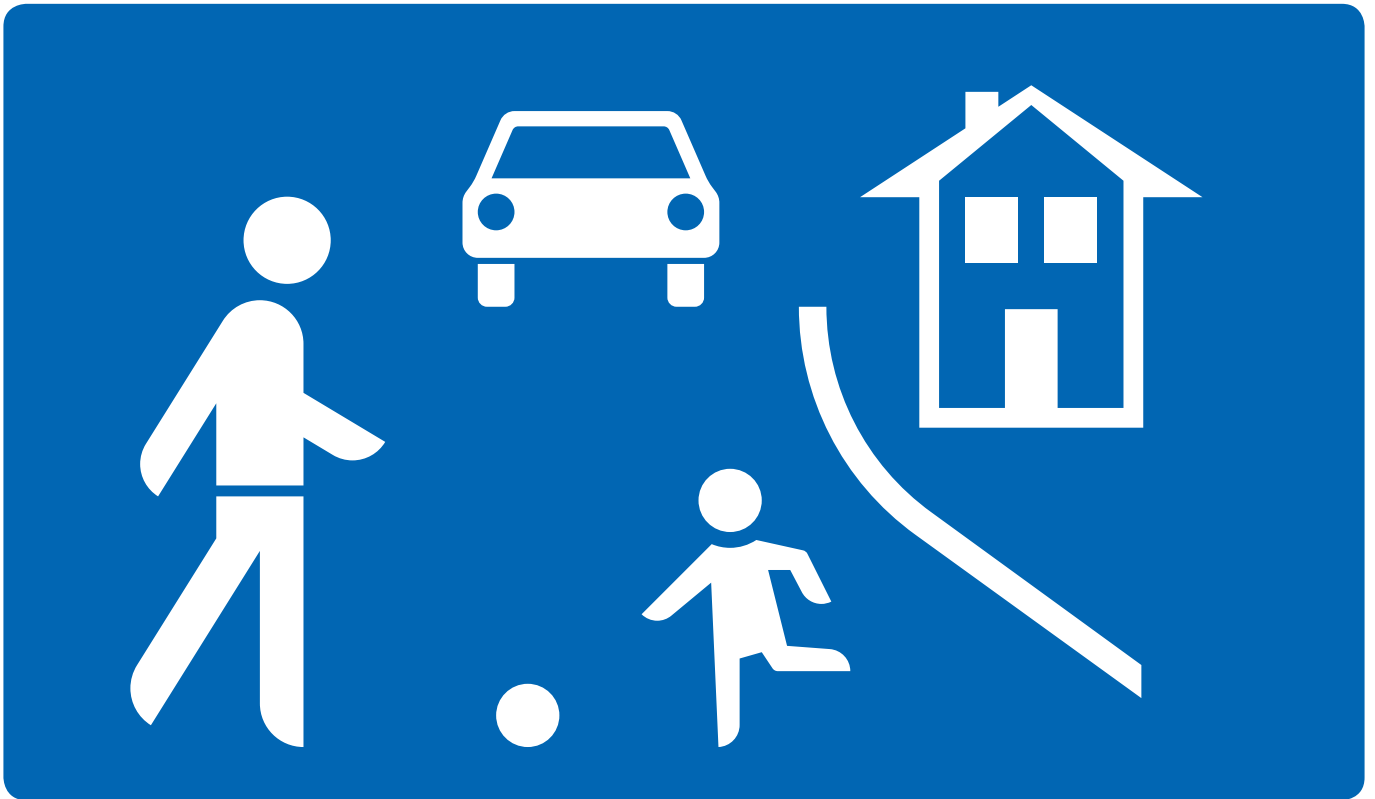


Illustration: OH (oben); designergold (unten)

gung in Ostdeutschland deutlich steigerte, haben sich die Sterbewahrscheinlichkeiten in den Altersgruppen ab 70 Jahren in Ostdeutschland denen in Westdeutschland angeglichen oder diese sogar unterschritten.

Nichts deutet darauf hin, dass dieser Trend im noch jungen 21. Jahrhundert schwächer wird, sodass sich bei Fortschreibung der historischen Zeitreihe bis zum Jahr 2050 eine Lebenserwartung von mehr als 92 Jahren abzeichnet. Ein heute geborenes Mädchen hat damit gute Chancen, das einst für die Mehrheit der Bevölkerung als unmöglich geltende Lebensalter von 100 Jahren zu erreichen. Die Gestaltung einer solchen Lebensspanne wird eine der zentralen Herausforderungen des demografischen Wandels für Individuum, Gesellschaft und Politik sein.

Es ist keine Neuigkeit, dass in Deutschland seit Jahrzehnten deutlich weniger Kinder geboren werden, als nötig wären, um die Zahl der Bevölkerung konstant zu halten. Rechnerisch müsste dafür die durchschnittliche Kinderzahl pro Frau bei 2,1 liegen;

Eine zunehmende Kinderlosigkeit wird traditionelle Strukturen nachhaltig verändern.

sie betrug im Jahr 2008 aber nur 1,36 (zum Vergleich: 1860 waren es etwa fünf Kinder pro Frau). Sogenannte *tempo effects*, also die Tatsache, dass Paare die Verwirklichung ihres Kinderwunsches zeitlich aufschieben, sorgen allerdings dafür, dass dieser Wert die tatsächliche Geburtenzahl unterschätzt.

So liegt die Kinderzahl für Frauen des Jahrgangs 1958, die bereits ihre reproduktive Phase abgeschlossen haben, bei 1,6. Das bedeutet jedoch immer noch eine zahlenmäßige Verringerung jeder nachfolgenden Generation um fast ein Viertel. Neueste Berechnungen des Statistischen Bundesamts zeigen – nun erstmals für Deutschland auf sicherer Datenbasis durch neue Fragen im Mikrozensus –, dass dies vor allem an der hohen Kinderlosigkeit in Deutschland liegt. Während die Zahl der Kinder je Mutter relativ stabil geblieben ist, stieg der Anteil kinderloser Frauen an und beträgt in der Altersgruppe 40 bis 44 Jahre aktuell 21 Prozent.

Steigende Lebenserwartung und niedrige Geburtenzahlen zusammen bewirken zunächst eine Alterung der Bevölkerung, die in Deutschland im internationalen Vergleich relativ schnell voranschreitet. Es ist zu erwarten, dass sich der Anteil der über 65-Jährigen an der Gesamtbevölkerung bis zum Jahr 2050 auf ein Drittel verdoppeln, während gleichzeitig die Gruppe der 15- bis 64-Jährigen um ein Fünftel schrumpfen wird. Diese Verschiebungen werden vor allem in den Bereichen Arbeit und Rente für weiteren Reformbedarf sorgen.

Die öffentliche Debatte bleibt oft bei diesem Befund über die Auswirkungen des demografischen Wandels stehen und berücksichtigt nicht, dass eine zunehmende Kinderlosigkeit im Land auch traditionelle Familienstrukturen nachhaltig verändern wird. Ein wachsender Anteil von Menschen wird ohne Kinder oder Enkelkinder bleiben. Herkömmliche Berührungspunkte zwischen Jung und Alt werden damit seltener.

Es ist darüber hinaus abzusehen, dass sich bei weiterhin hohen Scheidungszahlen Partnerschaftsformen verändern werden – mit weniger Menschen, die auch noch im Alter in einer klassischen Ehe leben. Eine erfolgreiche Sozial- und Gesellschaftspolitik der Zukunft sollte deshalb auch neue Familienformen in ihre Reformansätze einbeziehen.

Betrachtet man den Umgang mit den Ursachen und Folgen des demografischen Wandels auf politischer Ebene, so entsteht der Eindruck, dass immer noch ein Großteil der Energie auf Versuche verwendet wird, die Bevölkerungsalterung aufzuhalten oder zumindest abzubremesen. Das wird besonders deutlich, wenn man die Hintergründe der jüngsten Änderungen in der Familienpolitik genauer analysiert.

Das im Jahr 2007 eingeführte Elterngeld – mit jährlichen Kosten für den Staatshaushalt von vier Milliarden Euro – fußt auf einem zentralen Paradigmenwechsel der deutschen Familienpolitik, der 2004 durch ein Papier für das Bundesfamilienministerium mit dem Titel *Nachhaltige Familienpolitik im Zeichen einer aktiven Bevölkerungsentwicklung* verfasst wurde. Als Metaziel dieses Konzepts wird die Erhöhung der Geburtenrate genannt. Das bedeutet nichts anderes als den Abschied von einem jahrzehntelang aufrechterhaltenen Prinzip, keine Bevölkerungspolitik zu betreiben. Denn in einem modern verfassten, demokratischen Staat unterscheiden sich Familien- und Bevölkerungspolitik nicht in den Maßnahmen, sondern lediglich in den formulierten Zielen.



Familienpolitik sieht potenzielle Eltern als Subjekte, die in der Umsetzung ihrer Entscheidungen unterstützt werden sollen. Bevölkerungspolitik hingegen zielt in erster Linie auf die direkte Beeinflussung demografischer Prozesse und macht damit Menschen zum Objekt von Politikmaßnahmen.

Abgesehen von dieser normativen Konnotation zeigt das Elterngeld in der Tat erfreuliche Wirkung – so haben etwa mehr Väter als erwartet die finanziell großzügige Auszeit zur Kindererziehung angenommen. Eine nachhaltige Erhöhung der Geburtenrate blieb aber bis dato aus, was die politisch Verantwortlichen in der Medienberichterstattung durchaus unter Druck setzte. Dass das Metaziel bislang nicht erreicht werden konnte, verwundert jedoch nicht allzu sehr, wenn man die Effekte von familienpolitischen Maßnahmen in anderen Ländern in den Blick nimmt.

So zeigt das Beispiel Schweden, dass das Elterngeld nur ein Teil in einem ganzen Bündel von Faktoren ist und seine Wirkung auf die Geburtenrate im Zusammenhang mit Faktoren wie der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung oder der Erwerbsbeteiligung von Frauen gesehen werden muss (MAXPLANCK-FORSCHUNG 2/2005, Seite 70ff.).

In Deutschland ist aufgrund eines klaren Auftrags durch das Grundgesetz und eines immer wieder durch das Bundesverfassungsgericht angemahnten Handlungsbedarfs bei der Familienförderung die Unterstützung von Eltern und Kindern mehr geboten denn je. Eine Politik, die bei der Umsetzung dieser Vorgaben aber eigentlich die Erhöhung der Geburtenrate verfolgt, muss sich offensichtlich auf eine hohe Frustrationstoleranz einstellen. Zudem würde eine vom heutigen Tage an dauerhaft erhöhte Geburtenrate auf 2,1 Kinder pro Frau die Bevölkerungsalterung bis 2050 nur geringfügig abmildern. Das hat mit der Trägheit demografischer Prozesse zu tun: Ein heute geborenes Kind wird erst in 25 bis 30 Jahren selber Kinder bekommen.

Zusammenfassend lässt sich deshalb sagen, dass eine politische Steuerung der Bevölkerungsstruktur à la carte kaum möglich ist. Eine Erfolg versprechende politische Strategie für den demografischen Wandel sollte sich deshalb mit der Frage auseinandersetzen, wie die verschiedenen gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Bereiche des Landes auf die Bevölkerungsalterung vorbereitet werden müssen. Raum für kreative Konzepte ist reichlich vorhanden.

Der demografische Wandel kann durchaus als politische Großbaustelle bezeichnet werden – wie bei fast keinem anderen Phänomen sind praktisch alle Politikfelder betroffen: Bildung, Arbeit, Gesundheit, Familie, Wohnungsbau. Die Liste ließe sich noch erweitern, wie etwa die Themen Arbeitsmarkt, Gesundheit und Generationenbeziehungen zeigen.

Bereits heute herrscht in einigen wirtschaftlichen Bereichen Fachkräftemangel: Arbeitgeber finden nicht genügend geeignete Bewerber, um offene Stellen zu besetzen. Die Schrumpfung in den für den Ar-

Das Arbeitskräftepotenzial sinkt bis 2025 um fast neun Prozent.

beitsmarkt relevanten Altersgruppen könnte dieses Problem noch verschärfen. Der „Rostocker Indikator“ des Max-Planck-Instituts für demografische Forschung zeigt, dass bei konstanten altersspezifischen Erwerbsquoten und gleichbleibendem Produktivitätsniveau das Arbeitskräftepotenzial in Deutschland schon bis zum Jahr 2025 um fast neun Prozent sinken wird. Dieser Rückgang könnte abgefangen werden, indem man die heute niedrigen Erwerbsquoten in den höheren Altersgruppen steigert (MAXPLANCK-FORSCHUNG 2/2006, Seite 15ff.).

Im OECD-Vergleich gehört Deutschland bei der Arbeitsmarktbeschäftigung von Personen im Alter von 50 bis 64 Jahren zum unteren Drittel. Die Förderung der Beschäftigung von älteren Personen steht und fällt mit einer adäquaten Weiterbildung über den gesamten Berufsverlauf. Aber auch hier befindet sich Deutschland im internationalen Bereich auf einem der letzten Plätze, da die direkt aufgewendeten jährlichen Kosten für Weiterbildungsmaßnahmen – im Jahr 2005 durchschnittlich 237 Euro pro Beschäftigtem – nur einen geringen Teil der gesamten Arbeitskosten ausmachen.

Für die heute geborenen Generationen wird die Entwicklung und Förderung von konkreten Maßnahmen für ein lebenslanges Lernen noch wichtiger: Es steht zu erwarten, dass ein großer Teil dieser Menschen eine deutlich längere Lebensspanne als heute – teilweise bis zu 100 Jahre – organisieren muss. Das bestehende, starre Konzept „Ausbildung, Berufstätigkeit, Rente“ würde für viele Personen einen Ruhe-



stand von mehr als 30 Jahren bedeuten. Ein Gesellschaftssystem, das sich zu einem erheblichen Maß über den Bereich Arbeit definiert, wird sich solche Lebensverläufe nicht leisten können.

Handlungsbedarf besteht auch auf einem Feld, das sich ohnehin stets im Mittelpunkt von politischen Reformdiskussionen findet: dem Gesundheits- und Pflegebereich. Da die Wahrscheinlichkeit, pflegebedürftig zu sein, mit dem Alter steigt – im Jahr 2003 waren in Deutschland 34 Prozent der Männer und 53 Prozent der Frauen über 85 Jahre auf Pflege angewiesen –, scheint durch die Bevölkerungsalterung zunächst ein starker Anstieg der Gesundheitskosten zu drohen. Demografische Studien deuten aber darauf hin, dass die durch die steigende Lebenserwartung

In Deutschland fehlt es an einer bevölkerungsweiten Strategie zur Gesundheitsprophylaxe.

hinzugewonnenen Jahre nicht gänzlich in Krankheit verbracht werden. Die Menschen altern zu einem beachtlichen Teil gesund, sodass heute 65-Jährige im Durchschnitt deutlich fitter sind als ihre Altersgenossen von vor 20 Jahren.

Dennoch wird auch unter der optimistischen Annahme, dass alle hinzugewonnenen Lebensjahre gesunde Lebensjahre sind, der Pflegebedarf bis 2030 deutlich steigen: bei Frauen um 20 Prozent und bei Männern um 79 Prozent. Geht man davon aus, dass die Zahl der Jahre in Pflegebedürftigkeit proportional zu den dazugewonnenen Lebensjahren steigt, dann lägen die Werte für Frauen bei 39 und für Männer bei 127 Prozent. Diese Prognoseszenarios machen deutlich, dass gesundheitspolitische Maßnahmen gefördert werden müssen, welche die Chancen auf gesundes Altern erhöhen.

Präventiven Ansätzen kommt hier eine entscheidende Bedeutung zu. Finnland ist in Europa eines der Vorreiterländer und konnte mit groß angelegten Präventionsprogrammen deutliche Erfolge im Bereich von Herz-Kreislauf-Erkrankungen sowie jüngst bei Diabetes erzielen. Ärzte bemängeln, dass es in Deutschland an einer solchen bevölkerungsweiten Strategie zur Gesundheitsprophylaxe fehlt.

Auf Bundesebene wurde ein erster Schritt in diese Richtung Anfang 2005 mit dem Entwurf zu einem Präventionsgesetz getan. Dieser sah etwa die Einrichtung eines Nationalen Präventionsrats und die Erarbeitung von verbindlichen Präventionszielen vor. Beim Koalitionswechsel Ende 2005 wurde die Initiative dann zwar in den Vertrag der Regierungsparteien aufgenommen, aufgrund von Differenzen – vor allem hinsichtlich des Finanzierungskonzepts – sind allerdings die politischen Verhandlungen darüber de facto seit 2008 zum Stillstand gekommen.

Zur Diskussion in klassischen Politikfeldern wie Arbeit und Gesundheit bestimmt der demografische Wandel seit Kurzem auch den breiteren gesellschaftspolitischen Diskurs, vor allem was das zukünftige Verhältnis der Generationen anbelangt (MAXPLANCK-FORSCHUNG 1/2007, Seite 54ff.). Häufig wird darin angenommen, dass in modernen Wohlfahrtsstaaten ein wachsender Anteil älterer Menschen an der Gesamtbevölkerung den Spielraum zukünftiger sozialpolitischer Reformen begrenzt, nicht zuletzt deshalb, weil sie etwa eine durchgängig höhere Wahlbeteiligung aufweisen. Prognosen gehen zudem davon aus, dass im Jahr 2050 die Hälfte der deutschen Wahlbevölkerung über 56 Jahre alt sein wird.

Unter Berufung auf den demografischen Wandel sind in der Bundesrepublik in den vergangenen Jahren mehrere zentrale Politikreformen durchgeführt worden, die tendenziell darauf abzielen, die staatliche Unterstützung für die jüngere Generation auszubauen (zuletzt durch das Elterngeld). Bei der älteren Generation dagegen wurde eher das finanzielle Einsparpotenzial genutzt (etwa durch Rentennullrunden). Bei einem wachsenden Seniorenanteil könnte sich ein solcher Politik-Mix als wenig nachhaltig erweisen.

Sollten sich die politischen Präferenzen älterer Menschen für staatliche Transferzahlungen zwischen den Generationen – wie Kindergeld oder Renten – von jenen jüngerer unterscheiden, so könnte dies in einer alternden Gesellschaft in der Tat dazu führen, dass politische Entscheidungsprozesse schwieriger werden.

Ein solcher Alterseffekt konnte bisher in der Forschung nur selten nachgewiesen werden, vor allem aufgrund einer beschränkten Datenlage. Die meisten Umfragen im Bereich intergenerationaler Beziehungen enthalten hauptsächlich Fragestellungen zu privaten Transferleistungen, das heißt Unterstützungs-

potenzialen innerhalb der Familien. Fragen nach politischen Einstellungen zu staatlichen Transfers wiederum beschränken sich meist auf Einstellungen zu allgemeinen Verantwortlichkeiten des Staates gegenüber den verschiedenen Altersgruppen.

Da vor allem in Deutschland die sozialpolitische Verantwortung des Staates generell von allen (Alters-) Gruppen als sehr hoch eingestuft wird, lässt sich mit diesen Fragestellungen ein möglicherweise bestehender Alterseffekt kaum erfassen. Das Gros der wissenschaftlichen Untersuchungen, auf die sich auch die politischen Entscheidungsträger in Deutschland beziehen, sieht die These vom Konflikt um Ressourcen zwischen Alt und Jung in der Folge als nicht erwiesen an.

Jüngste Untersuchungen des Max-Planck-Instituts für demografische Forschung auf Basis neuer Daten kommen allerdings zu anderen Ergebnissen. Die Erhebungen mit jeweils mehreren tausend Befragten enthielten explizit auch Fragen nach der Unterstützung oder Ablehnung konkreter sozialpolitischer Reformen, etwa in Form von 13 familienpolitischen Maßnahmen. Ein solcher Ansatz erleichtert es Befragten, mögliche Wirkungen politischer Maßnahmen auf ihr eigenes Leben – oder das ihrer Kinder oder ihrer Eltern –, auf ihre finanzielle Absicherung oder ihre Handlungsmöglichkeiten zu berücksichtigen.

Die Analyse der Daten macht deutlich, dass bei der Frage nach spezifischen Politikreformen durchaus Alterseffekte auftreten. So haben ältere Befragte eine wesentlich geringere Neigung als jüngere, finanzielle Transfers an Familien (Kindergeld, steuerliche Erleichterungen für Eltern) zu unterstützen. Als weitere wichtige Einflussfaktoren konnten Elternschaft und Großelternschaft identifiziert werden.

(Enkel)kinderlose Befragte zeigten ebenfalls eine deutlich niedrigere Neigung, Transfers an die jüngere Generation zu befürworten. Im Zusammenspiel mit der höheren Wahlbeteiligung Älterer, der Bevölkerungsalterung und dem wachsenden Anteil kinderloser Menschen könnte das zukünftig Entscheidungsprozesse in einzelnen sozialpolitischen Bereichen erschweren.

Konkrete Anzeichen für vermehrte Konflikte zwischen verschiedenen demografischen Gruppen gibt es bereits heute. So sorgt der auf Bundesebene beschlossene Ausbau der Kinderbetreuung für Probleme in einigen deutschen Großstädten: In Hamburg und München klagen Anwohner immer häufiger ge-



DER AUTOR

Harald Wilkoszewski ist seit dem Jahr 2003 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für demografische Forschung in Rostock. Er hat dort am Aufbau des Arbeitsbereichs „Bevölkerung und Politik“ mitgewirkt und beschäftigt sich in seiner Forschung vor allem mit den Auswirkungen des demografischen Wandels auf politische Entscheidungsprozesse. Seit 2008 ist Wilkoszewski zudem Fellow bei der Stiftung Neue Verantwortung in Berlin und leitet dort eine Arbeitsgruppe zum Thema Age Diversity Management.

gen die notwendigen Bebauungsplanänderungen und berufen sich dabei auf die von Kindern verursachte Lärmbelastigung. Stadtverwaltungen sehen sich genötigt, die Einrichtungsbetreiber in Gerichtsverfahren aktiv zu unterstützen, durch externe Gutachten etwa. Und dennoch mussten bereits einige Betreuungsstätten aufgrund erfolgreicher Klagen schließen.

Diese Beispiele mögen noch Einzelfälle darstellen; sie machen aber die Bedeutung von demografisch durchmischten Nachbarschaften deutlich. Die räumliche Segregation von Jungen und Alten, von Eltern und Kinderlosen begünstigt potenzielle Konfliktlinien, denn regelmäßige Berührungspunkte gehen dadurch verloren. Ohne die kann aber ein für gegenseitiges Verständnis und Toleranz notwendiger Austausch nicht stattfinden.

Die Sozialpolitik der Zukunft muss diesen Faktor stärker berücksichtigen. Sie sollte darüber hinaus die unterschiedlichen Präferenzlagen verschiedener gesellschaftlicher Gruppen ernst nehmen und die politische Vermittlungsarbeit stärker in den Mittelpunkt stellen. Nur so kann sie innerhalb der Bevölkerung die notwendige Unterstützung für Reformen finden, die sozialstaatlich und demografisch geboten sind. ◀

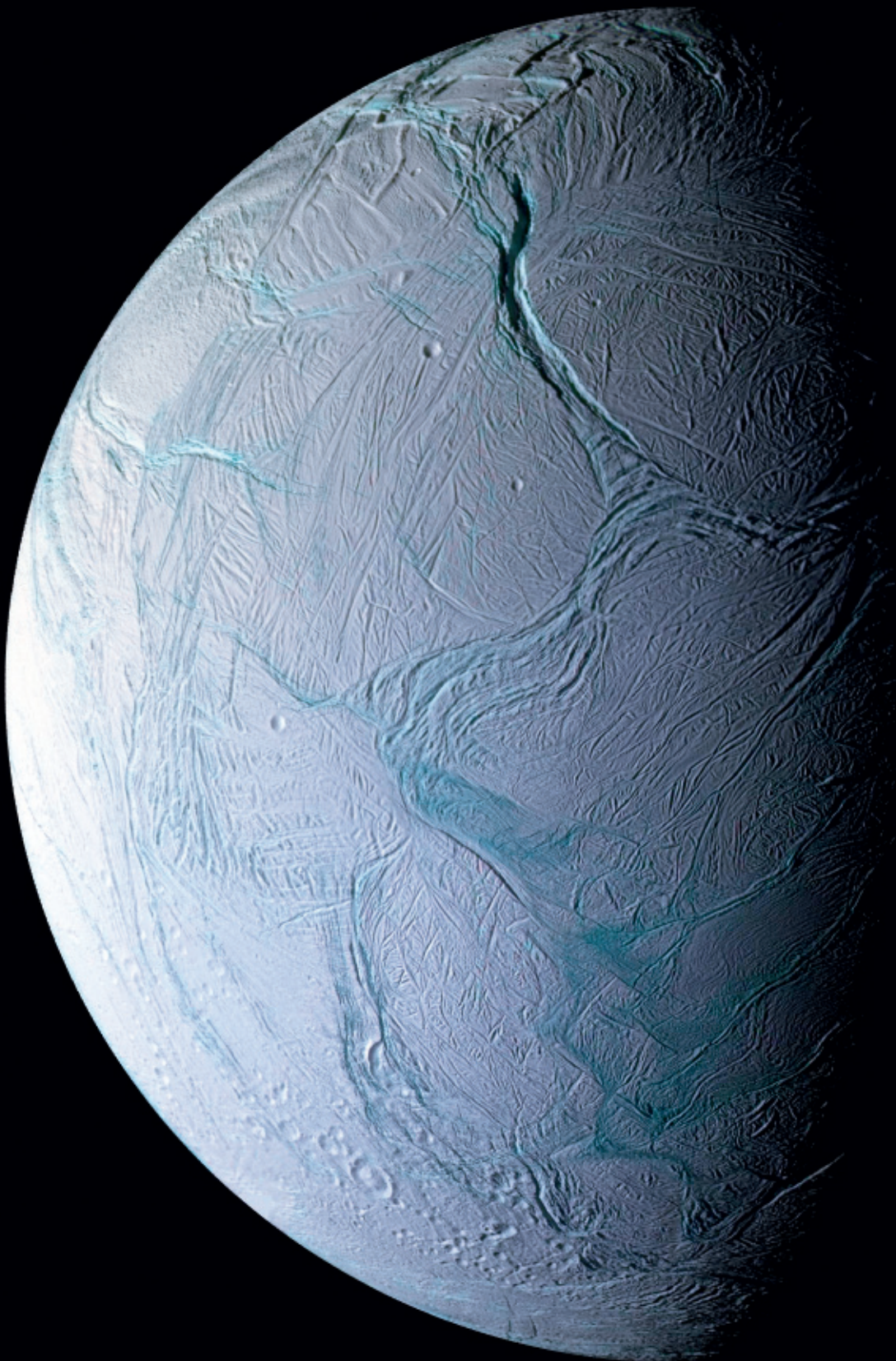


Foto: NASA/JPL/Space Science Institute

Der alte Mond und das Meer: Unter der vereisten Kruste des Saturntrabanten Enceladus vermuten die Forscher ein ausgedehntes Gewässer.

Die Suche nach dem Lebenselixier

Ob unter der Mitternachtssonne des Mars oder in der ewigen Dämmerung des Saturnmonds Enceladus: Forscher folgen der Spur des Wassers im Planetensystem. Mit im Boot Wissenschaftler aus den **Max-Planck-Instituten für Kernphysik** in Heidelberg und **für Sonnensystemforschung** in Katlenburg-Lindau.

TEXT **THORSTEN DAMBECK**

Kaum jemand kannte diesen winzigen Trabanten. Seit seiner Entdeckung vor 220 Jahren hatte er sich nie besonders hervorgetan. Lediglich die Fachwelt wusste, dass Enceladus als Mond des Saturn seine Runden zieht. Auch den beiden *Voyager*-Sonden, die vor mehr als zwei Jahrzehnten auf Stippvisite vorbeischaute, war nichts Ungewöhnliches aufgefallen. Doch die ausgedehnten Studien von *Cassini* – der unbemannte Späher umkreist den Ringplaneten seit 2004 – haben Enceladus in den Fokus der Forscher gerückt. Regelmäßig überfliegt die amerikanisch-europäische Raumsonde dessen eisbedeckte Landschaften und entdeckte: Der kaum 504 Kilometer durchmessende Mini-mond hat es buchstäblich in sich.

So schießen am Südpol von Enceladus riesige Fontänen aus Wasserdampf und Eispartikeln ins All. Der Quell die-

ses Schauspiels sind mehrere jeweils über 100 Kilometer lange Bodenrisse, oder genauer, aktive Stellen in diesen Rissen. Die Planetenforscher nennen sie *Tiger Stripes*. Diese Pforten in die Unterwelt des Mondes sind ungewöhnlich warm, stellenweise übersteigen die Temperaturen um mehr als 100 Grad das Umgebungsniveau. Befindet sich dort auch flüssiges Wasser im Untergrund?

BEIM THEMA WASSER WERDEN WISSENSCHAFTLER HELLHÖRIG

Immer dann, wenn es um Wasser im Sonnensystem geht, werden Planetologen hellhörig. Flüssiges Wasser gilt schließlich als eine Art Lebenselixier, als eine Vorbedingung für Leben, wie es von der Erde bekannt ist. Es ist durchaus denkbar, dass es eine ähnliche Rolle auch auf anderen planetaren Körpern spielt oder gespielt hat. >

Nach heutigem Kenntnisstand scheiden jedoch die Oberflächen der Monde und Planeten aus, nur auf der Erde konnten sich dauerhaft Gewässer bilden. Denn nur unser Heimatplanet kreist gerade im passenden Abstandsbereich um das Zentralgestirn. Etwas näher, bei etwa 90 Prozent der Distanz Erde-Sonne, würden die Temperaturen bereits 100 Grad Celsius überschreiten. In umgekehrter Richtung fällt dagegen das Quecksilber: Schon auf dem Mars ist alles einst vorhandene Wasser zu Eis gefroren.

Unter der rissigen Eiswüste des Enceladus scheint es dagegen warm genug zu sein; neueste Belege dazu liefert der *Cosmic Dust Analyzer* (CDA) an Bord von *Cassini*: Das Instrument entdeckte Partikel aus Wassereis, die zusätzlich das Element Natrium enthalten. „Ihr Fundort ist der E-Ring des Saturn – ein Staubring, der zwar viel größer, aber auch schwächer ist als die

bekannteren A- und B-Ringe, die man schon im Amateurlteleskop erkennt“, sagt Ralf Srama vom Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg, der das CDA-Experiment leitet.

IN SATURN'S E-RING GELINGT DEM DETEKTOR EINE PREMIERE

„Enceladus zieht seine Bahn im E-Ring, der kleine Mond speist dabei überwiegend die Partikel dieses Rings“, so Srama. Der CDA bringt rund 17 Kilogramm auf die Waage und ist ein sogenannter Staub-Detektor. Dabei wird der Begriff „Staub“ nicht wie im Alltagsdeutsch verwendet. Es geht um winzige Teilchen, die im Sonnensystem an vielen Stellen umherschwirren; sie werden in Mikrometern (tausendstel Millimeter) gemessen. „Mit seinem Massenspektrometer kann CDA die chemischen Elemente solcher Partikel entschlüsseln“, erklärt Srama.

Die technischen Vorgänger des Instruments flogen schon auf mehreren Weltraummissionen, im E-Ring des Saturn gelang jedoch eine Premiere: nämlich die gefrorenen Salzwassertröpfchen eines außerirdischen Gewässers aufzufangen – eines unterirdischen Sees auf Enceladus.

Der sechstgrößte Saturnmond erhält nur etwa ein Prozent der Sonnenwärme, mit der die Erde versorgt wird. Zur Mittagszeit erreichen die Temperaturen an seiner Oberfläche durchschnittlich minus 198 Grad Celsius. Völlig andere Verhältnisse herrschen jedoch unter seiner „Haut“: Jüngst veröffentlichte Modellrechnungen bieten einen Erklärungsansatz, warum die Südhalbkugel geologisch jung und aktiv ist – ganz anders als die uralte Nordhalbkugel. Demnach hat in Enceladus' Eismantel eine Konvektionsbewegung stattgefunden, bei der warmes Eis unter dem Südpol aufstieg und kaltes Eis, wohl am Nordpol, abwärts strömte.

Aus mindestens acht Rissen nahe des Südpols von Enceladus schießen Fontänen aus Gas und Eispartikeln ins All.

Ein Ozean im Modell: Unter der Kruste des Saturnmonds Enceladus werden Minerale aus dem Gestein im Wasser gelöst. Versprühte Tröpfchen gefrieren sofort, werden während der Passage durch den Spalt in der Eiskruste von zusätzlich anfrierendem Wasserdampf umhüllt und dann als Staubteilchen ausgestoßen.

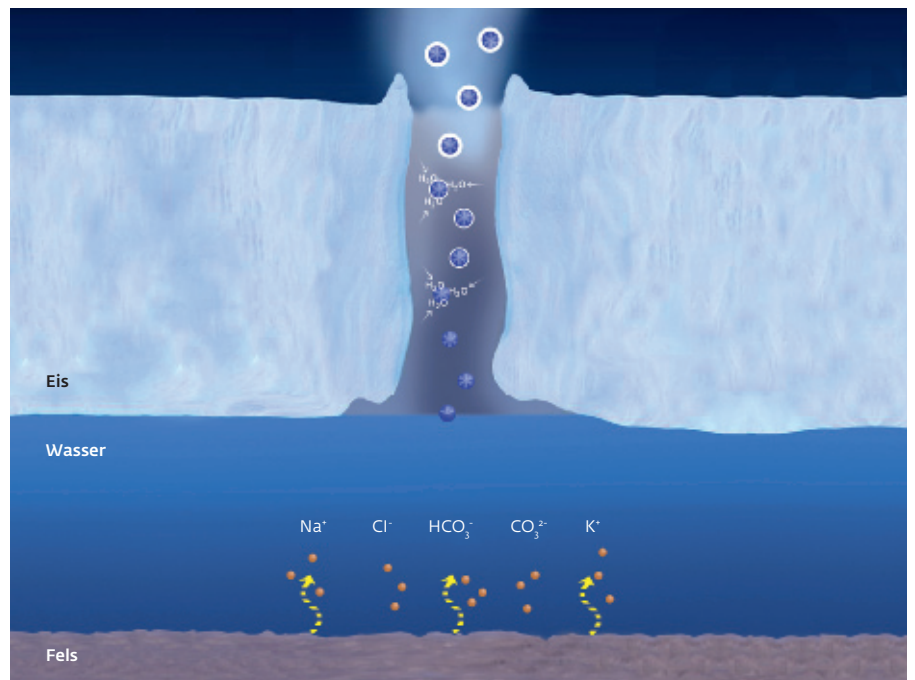
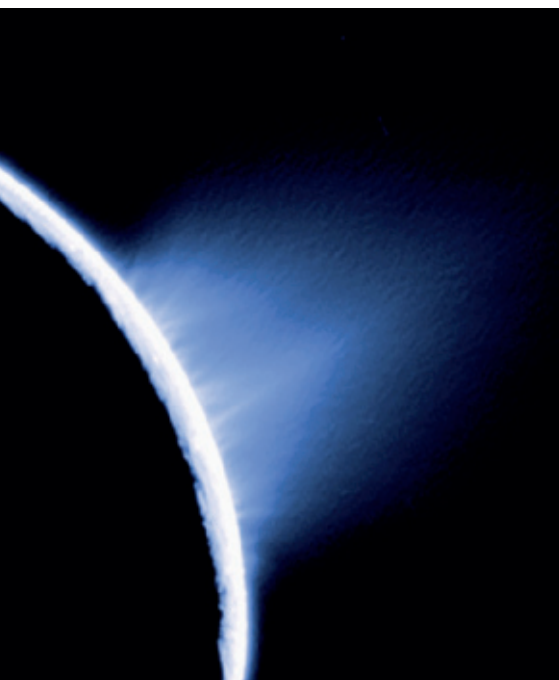


Foto: Cassini Imaging Team/SSI/JPL/ESA/NASA (links), Grafik: MPI für Kernphysik

Um eine solche Strömung anzutreiben, bedarf es einer Hitzequelle. Wahrscheinlich wird diese von der Gezeitenreibung gespeist. Denn die Umlaufbahn des Trabanten ist leicht elliptisch, er ändert also rhythmisch seinen Abstand zum Saturn, den er in 33 Stunden einmal umrundet. Im gewaltigen Gravitationsfeld des Ringplaneten zerrn die Gezeitenkräfte beständig an dem Mond und kneten ihn dabei gleichsam durch, woraus eine beträchtliche innere Wärmeentwicklung resultiert.

WAS LÄSST DIE FONTÄNEN SPRITZEN?

Die Forscher rätseln, ob die Konvektion bis heute andauert und ob Gezeitenwärme allein zur Erklärung der Strömung im Eis ausreicht. Beobachtungen jedenfalls zeigen, dass in der Tiefe immer noch genügend Hitze existiert, um das Seewasser vor dem Einfrieren zu bewahren und die Aktivität der Fontänen anzutreiben.

Denn dass sich dort ein solcher See verbergen muss, folgt aus den jüngsten CDA-Messungen. Bereits vor Jahren hatten Planetologen gefolgert: Wenn unter der Kruste von Enceladus wirklich flüssiges Wasser existiert und dieses bis zum warmen Gesteinskern des Mondes reicht, so müssten aus den dortigen Mineralien Natriumchlorid und weitere Salze ausgelaugt werden. Nun ist das Alkalimetall im Massenspektrometer des CDA-Instruments aufgespürt worden.

Frank Postberg vom Max-Planck-Institut für Kernphysik hat die Daten von 1000 E-Ring-Partikeln ausgewertet. Es sind Teilchen, deren Durchmesser zwischen einem und einem zehntel Mikrometer liegen – etwa so fein wie die Partikel in Zigarettenrauch. „Alle bestehen hauptsächlich aus Wassereis“, sagt Postberg. „Etwa sechs Prozent der Partikel sind jedoch anders, sie enthalten bis zu zwei Prozent an Salzen, hauptsächlich Natriumchlorid. Auch in irdischen Ozeanen ist Kochsalz das am häufigsten gelöste Mineral.“

Die Spektren zeigen zusätzlich Natriumkarbonat, Natriumbikarbonat und geringe Mengen an Kaliumsalzen. Der

Heidelberger Wissenschaftler, der von der Chemie über die Physik zu den Planeten kam, geht davon aus, dass diese Verbindungen aus einem salzigen See stammen. Denn nur wenn das Wasser in der Tiefe noch flüssig ist, kann es seine Salzfracht auf dem Weg zur kalten Oberfläche mitführen. Dabei werden die Tröpfchen gleichsam schockgefroren. Die meisten dürften wieder auf die Oberfläche fallen, manche schaffen es jedoch bis zum E-Ring und umkreisen dann den Saturn.

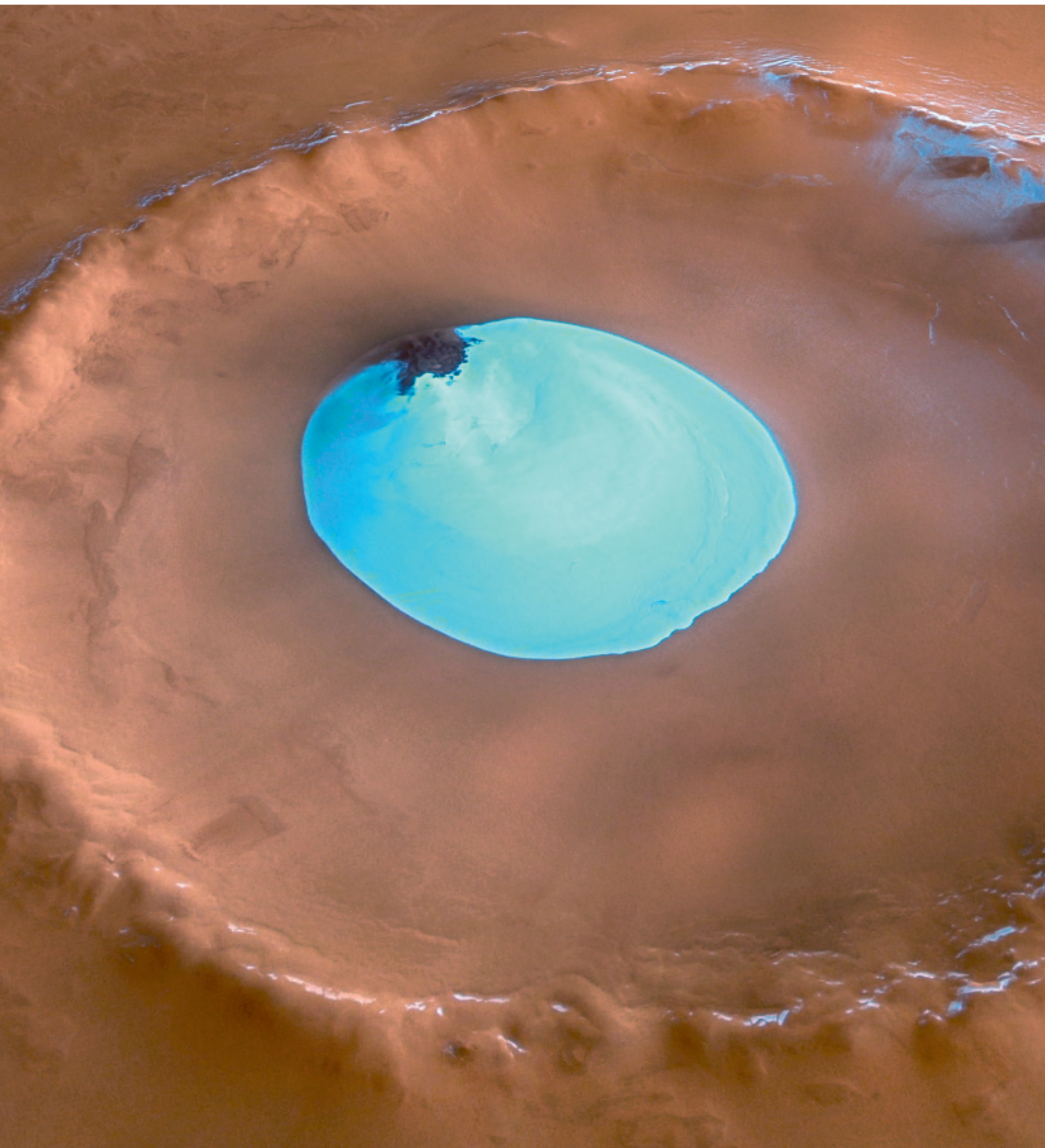
Im Innern der Tröpfchen sind die chemischen Verhältnisse im verborgenen See unter Enceladus' Eispanzer konserviert. Die überwiegende Popula-

tion der untersuchten E-Ring-Partikel, rund 90 Prozent, ist hingegen sehr salzarm, vergleichbar destilliertem Wasser. Postberg: „Diese Teilchen stammen aus einer Wolke aus Wasserdampf über dem See. Sie entstehen, wenn der mitgerissene Dampf zu reinen Wassereisteilchen kondensiert.“

Wie muss man sich das Gewässer vorstellen? „Der See steht mindestens auf einer Fläche von mehreren Quadratkilometern mit dem darüber liegenden Wasserdampf in Kontakt. Man kann also von großen, mit Dampf gefüllten Kammern ausgehen, die sich nach oben kaminartig verzüngen“, erklärt Postbergs Institutskollege Sascha



Wertvolles Stück: der 17 Kilogramm schwere Cosmic Dust Analyzer (kurz: CDA), eingepackt in glänzende Thermisulationsfolie. Das Instrument an Bord der Raumsonde Cassini analysiert die Umgebung des Ringplaneten Saturn. Zur Ausrichtung besitzt der Staub-Detektor einen Drehtisch.





Fotos: ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum)



Zum Schlittschuhlaufen lädt diese Eisfläche ein. Das Problem: Man müsste dafür zum Mars reisen. Das Eis lagert in der Sohle eines rund 35 Kilometer breiten Kraters in der Ebene Vastitas Borealis. Zeichen von Wasser zeigt auch das Bild oben – etwa zwei Kilometer hohe, von Eis und Staub überzogene Klippen am Nordpol des Roten Planeten.

Kempf, der wissenschaftliche Leiter des CDA-Experiments. Höchstwahrscheinlich sei der heutige Salzwassersee auf Enceladus kein globales Phänomen, sondern auf das Südpolgebiet begrenzt. Dafür spricht auch ein weiteres Indiz, das *Cassinis* Kamera im Oberflächenrelief des Südpols abgeleuchtet hat: eine große, etwa 500 Meter tiefe Senke – und darunter könnte sich der See befinden.

TROCKENTÄLER UND INSELN ALS BEWEIS FRÜHERER FLUTEN

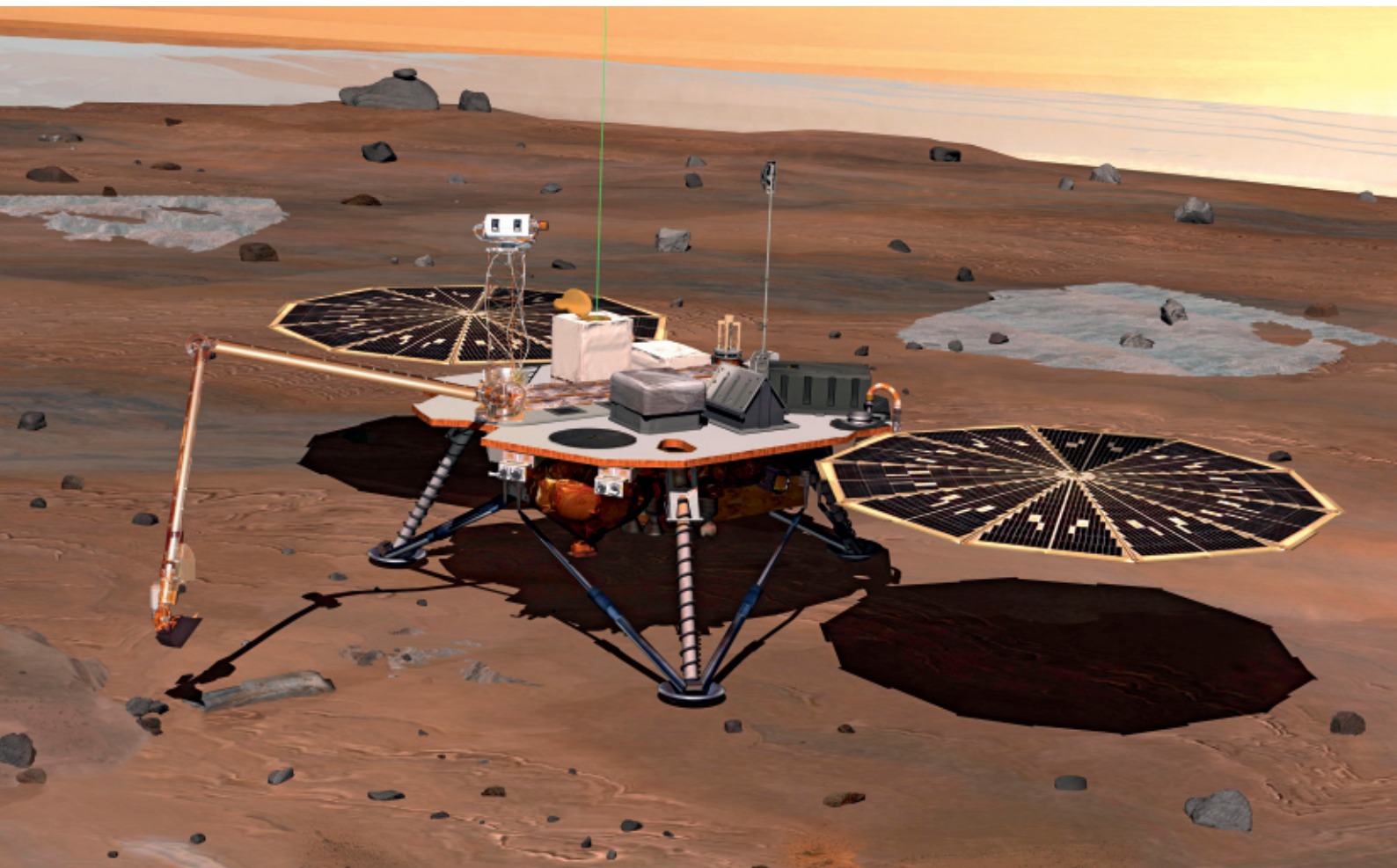
Enceladus ist nicht der erste Trabandt im eisigen Hinterhof des äußeren Sonnensystems, dem flüssiges Wasser unter seiner Kruste zugeschrieben wird. Bereits in den 1990er-Jahren fiel der Jupitermond Europa den Planetologen auf. Dort soll der Ozean in der Tiefe sogar globale Ausmaße besitzen. Auch weitere zwei der vier großen Jupitertrabanten, Ganymed und Kallisto, könnten Flüssigzonen unter ihren Eiskrusten verbergen.

Wenn Wissenschaftler den Blick zurück in die Frühzeit der Planeten wagen, stoßen sie schnell an die Grenzen ihres Wissens. Das gilt auch für unseren Nachbarplaneten, den Mars. Zwar wissen die Planetologen seit Jahrzehnten, dass in dessen Frühzeit Wasser –

auch in flüssiger Form – existierte. Riesige, teils gewundene Trockentäler samt stromlinienförmiger Inseln belegen noch nach Jahrmilliarden die erodierende Kraft der damaligen Fluten. Verbreitet sind auch die Relikte von Deltas. Sie entstanden, als die Wassermassen in stehende Gewässer mündeten, etwa Seen in den Senken von Einschlagkratern. Doch rätseln Forscher immer noch, ob der junge Mars nur kurze feuchte Klimaphasen erlebte oder ob das Wasser über lange geologische Zeiträume auf der Oberfläche vorhanden war.

Heute könnte es flüssiges Wasser in der dünnen und kalten Gashülle jedenfalls nur unter besonders günstigen Umständen und nur kurzzeitig auf der Oberfläche geben. Zweifelsfrei wurde es bislang nirgends beobachtet. Wassereis ist hingegen weit verbreitet, sowohl an den Polkappen als auch als Bodeneis in mittleren Breiten. Kann das Eis bisweilen schmelzen? Können, wenn sich das Klima wandelt, sogar lokale habitable Zonen entstehen? Rückzugsräume für potenzielle Mikroben, die womöglich bis heute in der eisigen Wüstenei überdauern haben?

Eine mögliche Mars-Oase hatte die Raumsonde *Phoenix* zum Ziel, mit der die amerikanische Raumfahrtbehörde NASA im Mai 2008 erstmals in den ho-



hen Norden des Wüstenplaneten vorstieß. Auch dort, bei 68,2 Grad areografischer Breite (das entspricht etwa dem nordschwedischen Kiruna) vermuteten Marsforscher Wassereis dicht unter der Oberfläche. Anders als die beiden seit Jahren im Einsatz befindlichen Marsmobile *Spirit* und *Opportunity* war der dreibeinige *Phoenix* stationär. Sein Auftrag: mit einem fast zweieinhalb Meter langen Schaufelarm diverse Bodenproben einsammeln und ihre chemische Zusammensetzung analysieren.

Die ersten Hinweise auf Eis im Untergrund lieferte nach wenigen Tagen die *Robotic Arm Camera* (RAC) aus dem Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in Katlenburg-Lindau. Dem gerade 415 Gramm leichten Gerät gelang ein spektakuläres Bild: Darauf sind gleißend helle Bodenschichten zwischen den Tellerfüßen von *Phoenix* zu erkennen. Offenbar hatten die Abgas-

strahlen der zwölf Landetriebwerke lockeres, rund fünf Zentimeter dickes Deckmaterial weggeblasen und das Eis zutage gefördert.

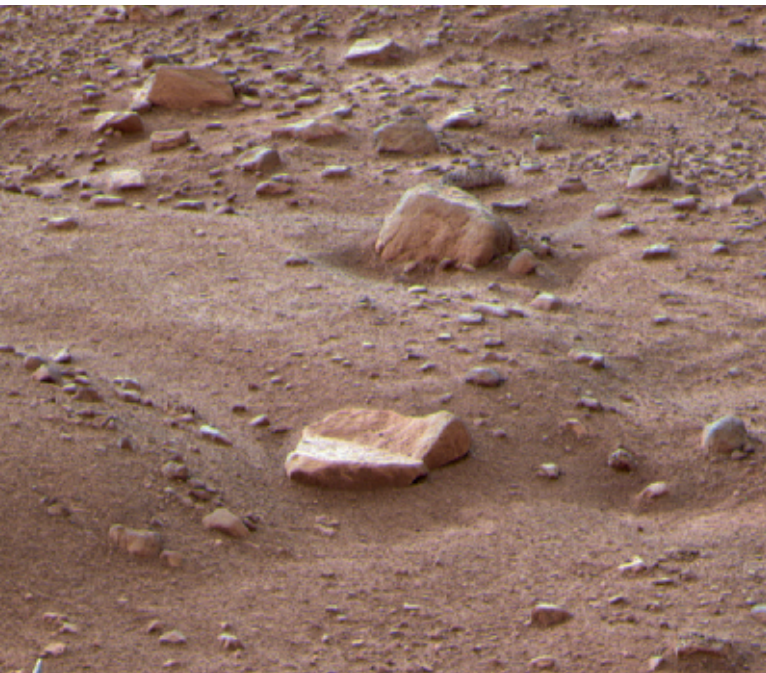
IM UNTERGRUND IST DAS EIS ÜBER LANGE ZEIT STABIL

Die Fotos der frisch ausgehobenen Gräben zeigten einen weiteren Beleg für Eis – ebenfalls helle, teils weiße Stellen. „Ist das Eis einmal ausgegraben und seiner thermischen Isolierschicht beraubt, beginnt es sich zu verändern“, sagt Walter Goetz, der am Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung die *Phoenix*-Daten auswertet. Freigelegt beginnt das Eis zu sublimieren, das heißt, es verdampft ohne zuvor aufzutauen. Im Untergrund ist es jedoch über lange Zeiträume stabil.

Hauptaufgabe der RAC war es, die Probenahme mit dem Schaufelarm zu

dokumentieren. Die chemische Untersuchung sorgte für einige Überraschung: Das TEGA-Instrument (*Thermal Evolved Gas Analyzer*) an Bord von *Phoenix* fand nur geringe Mengen an Wassereis. Es zeigte sich als frei werdendes Gas im eingebauten Massenspektrometer, als die Bodenproben schrittweise erhitzt wurden. Die geringen Wassermengen unter 295 Grad Celsius sprechen für einen trockenen Boden ohne Eis und ohne Wasser, das an den Oberflächen der Bodenmineralien haftet.

Dieses Ergebnis lässt sich offenbar mit der speziellen Probe erklären. Denn es stellte sich als schwierig heraus, den klumpigen eishaltigen Boden in die TEGA-Öfen zu bugsieren. Bei höheren Temperaturen, die bis auf 1000 Grad Celsius gesteigert wurden, fand das Instrument dann aber doch Wasser. „Das ist möglicherweise H₂O, das als Kristallwasser in den Minerali-



- links | Der *Phoenix* ist gelandet! Die Marssonde erforschte im vergangenen Jahr von Mai bis Anfang November die nördliche Polarregion des Mars. An Bord befand sich auch Gerät aus dem Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung.
- oben | Frostige Marslandschaft: Eine der letzten *Phoenix*-Aufnahmen vom 28. Oktober 2008 (links). Kurze Zeit später ging der Landefähre am Ende des arktischen Sommers der Solarstrom aus, die Nachttemperaturen fielen zu dieser Zeit auf eisige 89 Grad Celsius unter null. *Phoenix* lebte zwar nicht ganz so lange wie erhofft, bescherte den Forschern aber eine reiche Beute – so etwa die Entdeckung von Wassereis, das von den Landetriebwerken freigelegt und mit der *Robotic Arm Camera* abgelichtet wurde (rechts).

en des Marsbodens gebunden ist“, erklärt Physiker Goetz. Zusätzlich fahndete das *Wet Chemistry Laboratory* nach löslichen Substanzen im Boden. Die nötige Feuchtigkeit dazu lieferte irdisches Wasser – *Phoenix* hatte es eigens mitgebracht.

Beide Instrumente enthüllten eine bemerkenswerte Bodenchemie: Erstmals maßen sie einen basischen pH-Wert, der etwa bei 7,7 liegt. Am Äquator, wo *Spirit* und *Opportunity* den Mars erkunden, ist das anders. Ihre Bodenuntersuchungen sprechen für ein eher saures Ambiente. „Außerdem wurden Perchlorat-Salze identifiziert“, sagt Goetz. Diese Verbindungen aus Sauerstoff und Chlor seien eine ziemliche Überraschung. Sie könnten darauf hindeuten, dass der Boden einst aufgetaut war.

Manche Forscher halten es sogar für möglich, dass die Frostschutzwirkung des Perchlorats selbst bei Temperaturen

bis zu minus 70 Grad Celsius Wasser flüssig halten könnte. Als Indiz werden auch Fotos der RAC ins Feld geführt: Darauf sind auf einem Landebein von *Phoenix* kleine runde Gebilde zu erkennen, die als Tropfen gedeutet werden. Nach dieser Hypothese handelt es sich um Bodeneis, das in den letzten Sekunden des Abstiegs von der Hitze der Landetriebwerke geschmolzen wurde und dabei nach oben spritzte.

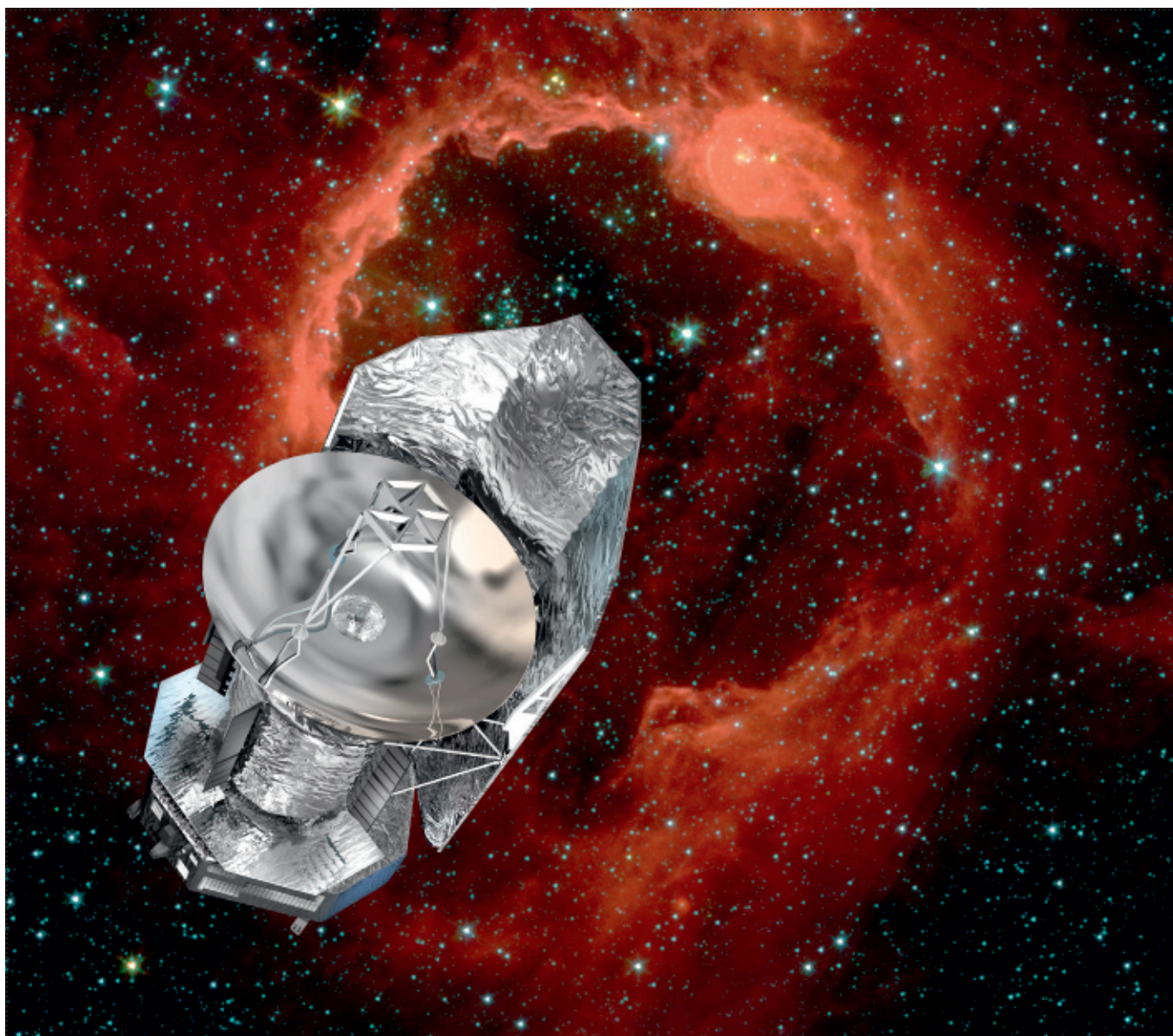
IM MARSBODEN LAGERT AUCH EIN WENIG KALZIUMKARBONAT

Das TEGA-Instrument entdeckte im Marsboden außerdem einige Prozent Kalziumkarbonat. Lange hatten Planetologen vergeblich versucht, es auf dem Roten Planeten dingfest zu machen. Skeptiker argumentierten: Wenn der Mars einst tatsächlich für längere Zeit wasserreich war, so müsste sich mit

dem Kohlendioxid seiner Gashülle fast zwangsläufig Kalziumkarbonat in messbaren Mengen gebildet haben.

Jetzt spürte *Phoenix* das Karbonat im Marsboden tatsächlich auf. Von zahlreichen Mineralienkörnchen, allerdings noch unbekannter chemischer Zusammensetzung, liegen nun auch farbige Porträtfotos vor. Einige könnten das neu gefundene Kalziumkarbonat enthalten. Die Porträts der winzigen Partikel stammen von der Mikroskopkamera, zu der die Max-Planck-Forscher in Katlenburg die Hardware beisteuerten.

Auch die Daten der kanadischen Wetterstation an Bord von *Phoenix* zeigen die Rolle von H₂O auf dem heutigen Mars. Mit den zurückgestreuten Strahlen eines Lasers wurde die vertikale Schichtung der Wolken aus Eiskristallen über dem Vehikel ermittelt. Als an der Landestelle Hochsommer



HERSCHEL HILFT MIT HIFI

Das im Mai 2009 gestartete europäische Weltraumteleskop *Herschel* wird ebenfalls bei der Wassersuche im Planetensystem helfen. Mars, die Gasriesen sowie die Saturnmonde Titan und Enceladus stehen auf der To-do-Liste. Bei den Gasplaneten werden die Forscher insbesondere die Stratosphären unter die Lupe nehmen. Wie kommt der Wasserdampf dorthin? Zwar geht man von Wasser im Innern der Gasplaneten aus; bis in die Stratosphären kann dieses aber wahrscheinlich nicht gelangen. „Eigentlich müssten diese Atmosphärenschichten knochentrocken sein“, erklärt Paul Hartogh, der das Beobachtungsprogramm vom Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung aus leitet.

Messungen zeigen jedoch, dass dies nicht der Fall ist. „Beim Jupiter vermuten wir Kometeneis als Quelle, das bei Einschlägen eingetragen wird“, so Hartogh. Andere denkbare Ursachen sind interplanetare Staubkörner, die auch Wassereis enthalten, oder – etwa im Fall des Saturn – eishaltige Ringpartikel. *Herschels* HIFI-Instrument (*Heterodyne Instrument for the Far-Infrared*) soll es ermöglichen, zwischen diesen unterschiedlichen Prozessen zu unterscheiden. HIFI ist das empfindlichste, je für das ferne Infrarot gebaute Spektrometer. Es wurde in internationaler Zusammenarbeit entwickelt. Unter der Koordination des niederländischen Institute for Space Research waren auch mehrere Max-Planck-Institute beteiligt. Das Instrument soll die räumliche Verteilung ermitteln, insbesondere die Vertikalprofile des Wasserdampfs in den Gashüllen der Planeten.

herrschte, fanden die Mars-Meteorologen Wolken oberhalb von zehn Kilometer Höhe.

... DIE WEITEREN AUSSICHTEN: VERBREITET BODENNEBEL

Weiter im Marsjahr fielen am Boden die Nachttemperaturen bis unter minus 90 Grad Celsius. Die Untergrenze der Schneewolken sank ebenfalls, bis auf eine Höhe von vier Kilometern. Dazu meldete der Wetterautomat an das Kontrollzentrum fast allnächtlich Bodennebel. In den kälteren Tagesstunden konnten *Phoenix'* Augen das gefrorene Wasser sogar sehen: Die Bordkamera fotografierte immer wieder dünne Schichten aus hellem Reif, der bei höherem Sonnenstand wieder vom Marsboden verschwand.

In einer kürzlich erschienenen NATURE-Publikation kommt das *Phoenix*-Team zu folgendem Fazit: Es verdichten sich die Hinweise auf periodisch im Boden der Landestelle vorhandenes flüssiges Wasser. Die dafür nötigen günstigeren Klimaphasen könnten durch zyklische Änderungen der Rotationsachsen-Neigung des Mars und der Parameter seiner Umlaufbahn eingeleitet werden. Phasenweise könnte in der jüngeren geologischen Vergangenheit die Landestelle also tatsächlich lebensfreundlich gewesen sein.

Inzwischen ist die *Phoenix*-Mission abgeschlossen. Es war erst die sechste erfolgreiche Marslandung überhaupt. Naturgemäß liegen also die Daten von der Oberfläche des Roten Planeten nur punktuell vor.

Trotzdem suchen Marsforscher Antworten auf die große Frage nach der Klimageschichte des Erdnachbarn: Wohin verschwand das Marswasser und welche Prozesse ermöglichten dies? Oder, wenn das Nass heute lediglich gefroren ist, wo verbergen sich diese einst so beträchtlichen H₂O-Mengen? Für ein Gesamtbild sind auch die Messungen der beiden baugleichen schwedischen ASPERA-Instrumente wichtig, die auf zwei ESA-Sonden seit mehreren Jahren Mars und Venus umrunden. Mit ASPERA (*Analyzer of Space Plasma and Energetic Atoms*) lassen sich die Prozesse studieren, die heute zum Verlust des Wassers führen.

Klar ist, dass in den höheren Schichten der Atmosphären die Wassermoleküle von den energiereichen UV-Strahlen der Sonne gespalten werden. Auf dem verhältnismäßig kleinen Mars sorgt die geringe Schwerkraft dafür, dass ein Teil der leichten Wasserstoffatome schon als neutrale Teilchen entweichen kann. Anders dagegen auf den gewichtigeren Planetengeschwistern Venus und Erde: Dort muss das H-Atom zuerst ionisiert werden, um in größeren Höhen durch das induzierte Magnetfeld des Sonnenwinds einen zusätzlichen Kick weg vom Planeten zu bekommen.

Solche Puzzlestücke tragen die Wissenschaftler mit ihren Messungen zusammen. Sie hoffen auf eine Verlängerung der Planetenmissionen, über die bei der europäischen Raumfahrtagentur ESA im Herbst entschieden wird. Denn es bedarf noch langer Jahre der akribischen Forschung, bis ein vollständiges Bild der Geschichte des Wassers in unserem Sonnensystem vorliegt. ◀

GLOSSAR

Cassini

Eine Sonde, die nach dem französischen Astronomen Giovanni Domenico Cassini (1625 bis 1712) benannt ist. Das im Jahr 1997 gestartete Raumschiff – ein Gemeinschaftsprojekt der amerikanischen NASA und der europäischen ESA – kreist seit Juli 2004 im Saturnsystem. *Cassini* trug die kleine Sonde *Huygens* an Bord, die am 14. Januar 2005 auf dem Saturnmond Titan landete.

Massenspektrometrie

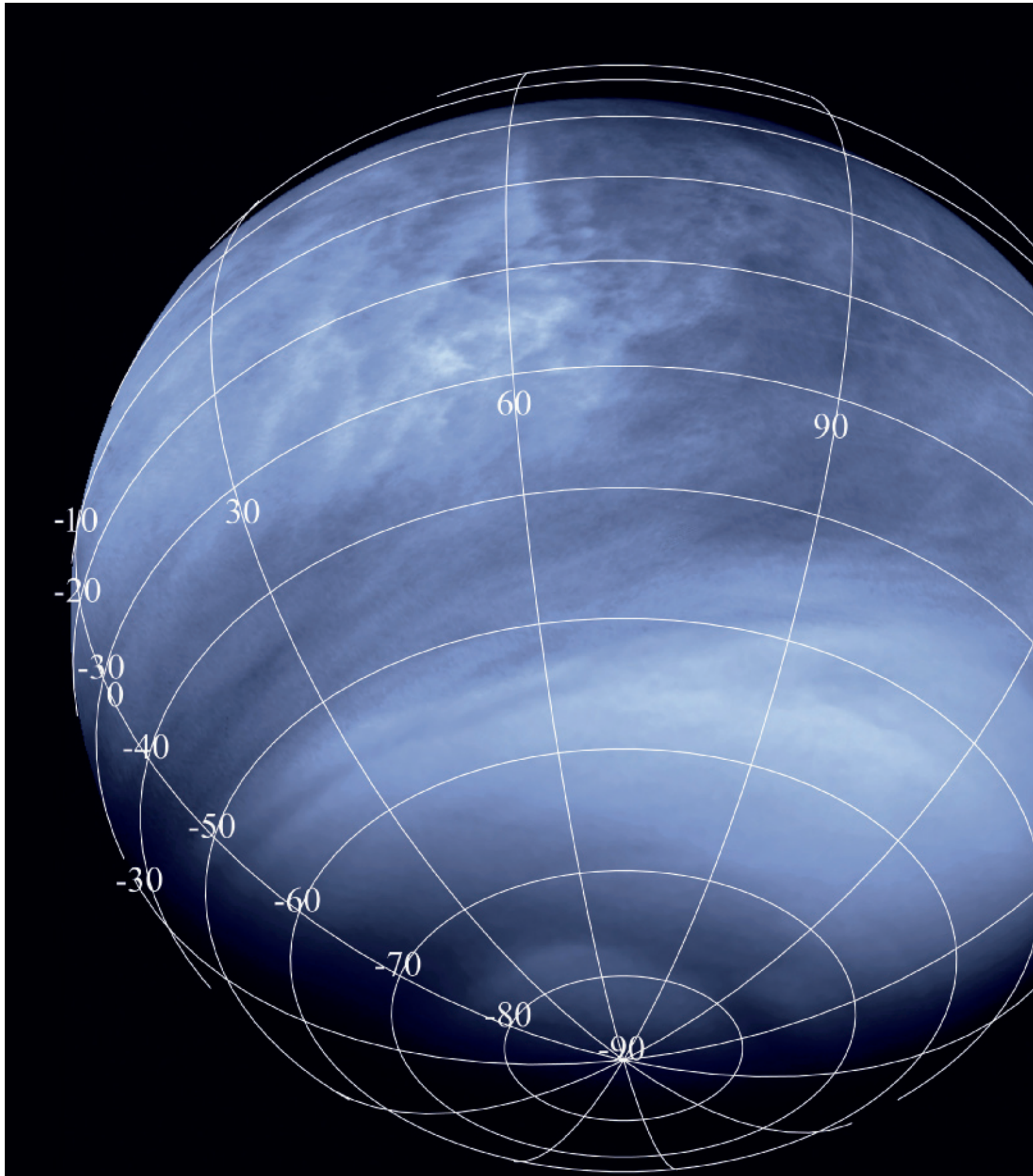
Verfahren, um das Verhältnis von Masse und Ladung von Teilchen zu bestimmen. Die Probe wird zunächst in die Gasphase überführt. Dann wird das Gas ionisiert, die ionisierten Teilchen werden im elektrischen Feld beschleunigt und analysiert. Mittels der Massenspektrometrie lassen sich chemische Elemente oder Verbindungen bestimmen.

Saturnringe

Sie wurden im Jahr 1656 von Christiaan Huygens als solche identifiziert. Man unterscheidet gewöhnlich sieben Komponenten, die von A bis G bezeichnet sind. Das System hat einen Durchmesser von 960 000 Kilometer und ist nur wenige hundert Meter dünn. Die Ringe bestehen aus unzähligen einzelnen Brocken.

Sonnenwind

Gas, das ständig von der Sonnenkorona in den interplanetaren Raum abströmt. Dieses Plasma enthält geladene Teilchen – im Wesentlichen freie Elektronen, Wasserstoffkerne (Protonen) sowie Heliumkerne. Der Sonnenwind „bläst“ in Erdentfernung mit durchschnittlich 400 Kilometer pro Sekunde und ist unter anderem die Ursache für die Bildung der Gasschweife von Kometen.



Die Göttin der Liebe und Schönheit verbirgt ihr Antlitz hinter einem dichten Wolkenschleier. So müssen Forscher der Venus mit besonderen Instrumenten zu Leibe rücken – etwa mit der *Venus Monitoring Camera* (siehe Seite 28).

Die Gluthölle hinter dem Schleier

Seit mehr als drei Jahren umkreist die erste europäische Venussonde unsere Nachbarin im Sonnensystem: *Venus Express* hat ein bizarres Inferno im Visier. **Dmitriy Titov** vom **Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung** in Katlenburg-Lindau koordiniert Missionsplanung und Datenauswertung.

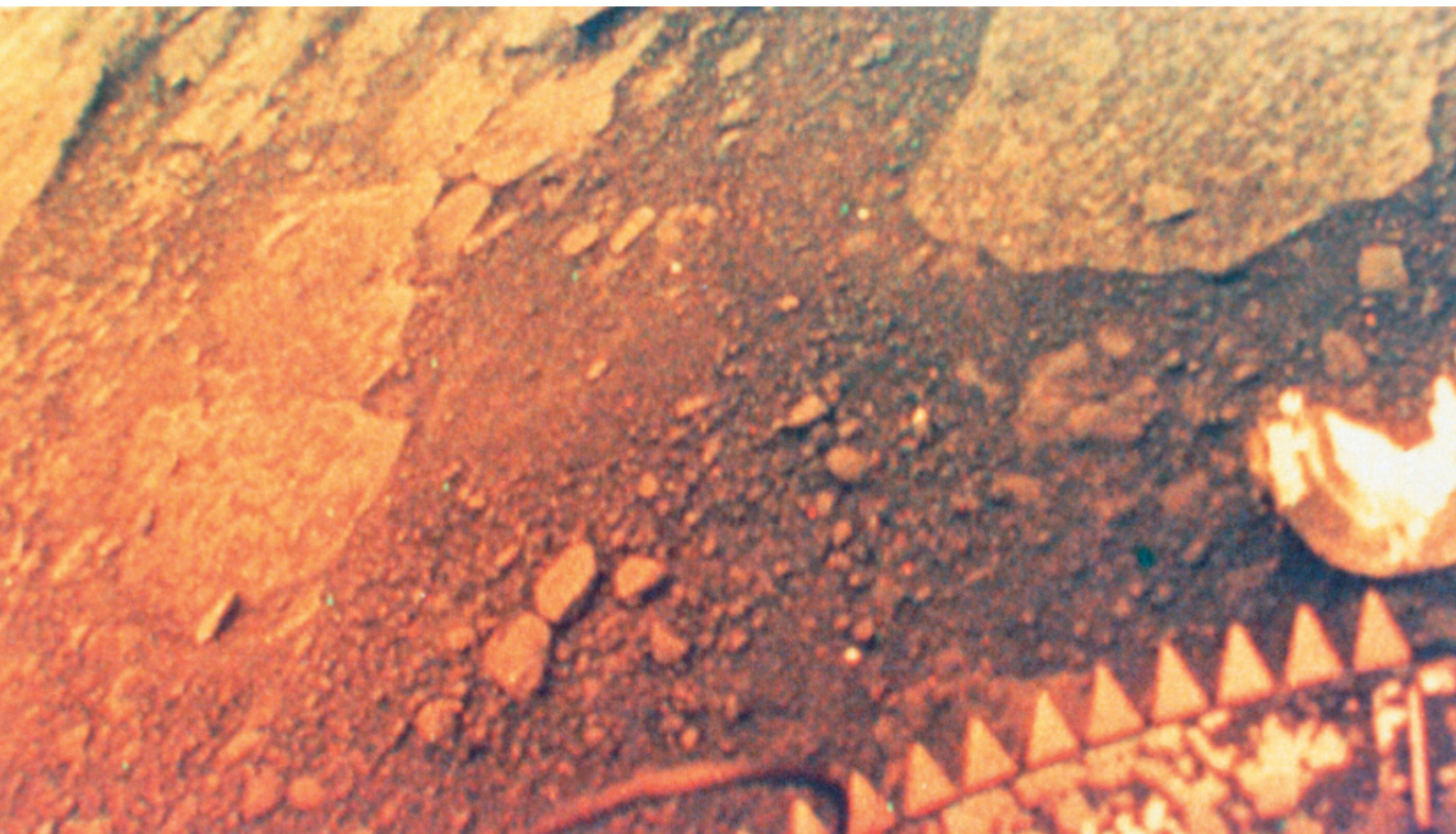
TEXT **THORSTEN DAMBECK**

Betrachtet man die nüchternen Zahlen, sollte die Venus eigentlich eine Art Zwilling der Erde sein. Ihr Durchmesser beträgt 12100 Kilometer, entsprechend 95 Prozent jenem unseres Planeten. Das Gleiche gilt für die mittlere Dichte (94 Prozent) und die Masse (82 Prozent). Gleichzeitig ist der 108 Millionen Kilometer von der Sonne entfernte Planet (Erde: 150 Millionen Kilometer) aber völlig anders: Am Venushimmel etwa hängen ätzende Wolken aus Schwefelsäure – ein fast undurchdringlicher Schleier, hinter dem

sich unsere Nachbarin vor allzu neugierigen Blicken der Wissenschaft verbirgt. Deshalb konnten Astronomen mit ihren Teleskopen lange Zeit nichts im konturlosen Gelb der Planetenscheibe ausmachen. Die dürre Faktenlage spornte die Fantasie der Forscher an: Gibt es dort Wüsten, ähnlich der Sahara, oder gar tropische Regenwälder? Bereits die ersten Raumsonden räumten mit solchen Spekulationen auf. Im Vorbeiflug gelangen *Mariner 2* schon 1962 zwei wichtige Befunde, die den vermeintlichen Planetenzwilling in einen scharfen Gegensatz zur Erde stellten:

Erstens fand *Mariner* fast kein Wasser in der Venusluft und zweitens meldete die US-Sonde mörderische Temperaturen auf der Oberfläche. Die These vom Venusdschungel war passé.

Im Jahr 1967 schickte *Venera 4* einen Wetterbericht direkt aus der heißen Gashölle. Die sowjetische Sonde bestätigte das Vorhandensein der an Kohlendioxid reichen Atmosphäre. Ab den 1970er-Jahren sandten mehrere Landegeräte der UdSSR sogar Panoramafotos vom Boden und präzisierten die Wetterdaten: Der Luftdruck am Boden liegt bei 92 Bar, auf der Erde muss man für



EIN MONITOR FÜR DIE VENUS

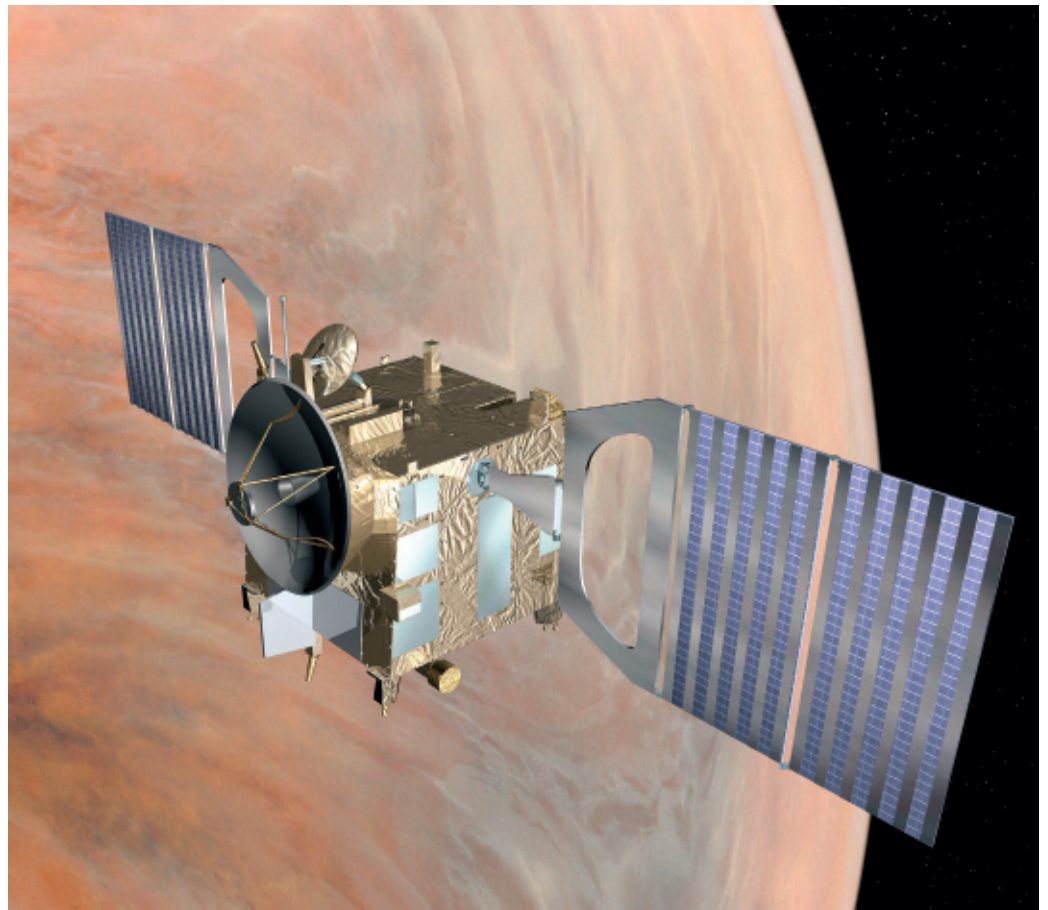


Die *Venus Monitoring Camera* (VMC) wurde unter Federführung des Max-Planck-Instituts für Sonnensystemforschung zusammen mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Berlin und dem Institut für Datentechnik der TU Braunschweig gebaut. Das kompakte Gerät, das kaum 1,8 Kilogramm wiegt, hat ein Gesichtsfeld von 17,5 Grad; die Venus passt im entferntesten Punkt des elliptischen Orbits gerade komplett ins Bild. Die ve-

Schatzkästchen für Planetenforscher: Die *Venus Monitoring Camera* liefert Bilder der Erdnachbarin im ultravioletten bis nahen infraroten Bereich des Lichts.

nusnahen Abschnitte des Umlaufs sind für Detailstudien bestimmt. Je nach Distanz variiert die Auflösung zwischen 200 Metern und 50 Kilometern.

Um das Design einfach und unanfällig für technische Störungen zu halten, wurde auf bewegliche Teile, etwa Filterräder, weitgehend verzichtet. Vier verschiedene Wellenlängen, vom UV über das sichtbare Licht bis zum Infraroten, werden simultan auf demselben Sensor abgebildet. Jede Wellenlänge nutzt dabei eine Teilfläche des lichtempfindlichen Chips. Noch vor der Übertragung der Fotos an den Bordrechner werden die Bilddaten in der Kamera ersten Bildverarbeitungsschritten unterzogen.



links | Temperaturen um die 460 Grad Celsius und ein Druck wie in 900 Meter Meerestiefe machen das Überleben selbst für Roboter schwierig. Daher sind Ansichten der Venusoberfläche selten. Das Bild links nahm die russische Raumsonde *Venera 13* auf.

rechts | An der Datenauswertung des europäischen Spähers *Venus Express* sind Max-Planck-Forscher maßgeblich beteiligt.

solche Druckwerte mehr als 900 Meter tief ins Meer abtauchen. In der steinigen Venuswüste herrschen Temperaturen von durchschnittlich 457 Grad, Blei würde dort umgehend schmelzen. Und über den verhangenen Himmel rasen die Venuswolken im Formel-1-Tempo.

WIE KOMMT DIE ERDNACHBARIN ZU IHREM TREIBHAUS?

Obwohl bereits mehr als 30 Sonden die Venus erreichten, blieben viele Fragen unbeantwortet: Was treibt die stürmische Venusatmosphäre an? Warum rotiert die Atmosphäre 60-mal schneller als der Planet selbst? Verbergen sich unter den dichten Wolken noch aktive Vulkane? Auch die Haupt-

frage blieb offen: Warum nahm die Venus ihren seltsamen Entwicklungspfad zu dem Treibhaus von heute?

Seit April 2006 umkreist nun *Venus Express*, der erste Späher der Europäischen Weltraumbehörde ESA, die Erdnachbarin. An Bord arbeitet ein halbes Dutzend Messgeräte und Kameras daran, Antworten zu finden, sie weisen die Mission als wahrhaft europäisches Projekt aus. So ist das italienisch-französische *VIRTIS* ein abbildendes Spektrometer, das heißt, es fungiert auch als Kamera. Die tiefen Atmosphärenschichten und die Oberfläche lassen sich damit studieren. Den chemischen Aufbau der Gashülle analysiert das von französischen Forschern geleitete *SpicaV/Soir*-Spektrome-

ter. Es stützt sich auf das Licht der Sonne und einzelner Sterne, das beim Durchgang durch die Venusatmosphäre analysiert wird.

93 KILO AN EXPERIMENTEN

Forscher aus Deutschland sondieren mit dem Radioexperiment VeRa Ionosphäre, Atmosphäre und die Oberfläche. Das schwedische *ASPERA*-Experiment dient dazu, die Wechselwirkungen zwischen Hochatmosphäre und dem Sonnenwind zu studieren. Auch zwei Neuentwicklungen gehören dazu: das österreichische Magnetometer *MAG* und die deutsche Weitwinkelkamera *VMC*, die unter Federführung des Max-Planck-Instituts für Sonnensystemfor-

schung entwickelt wurde (siehe Seite 28). Zusammen bringt die Nutzlast 93 Kilogramm auf die Waage.

Das Institut in Katlenburg-Lindau ist mit dieser Mission zu einem Zentrum der Erforschung unseres Schwesterplaneten avanciert. Täglich landen Bilder und Messdaten auf dem Schreibtisch von Dmitriy Titov. Der russische Physiker koordiniert die Missionsplanung und die wissenschaftliche Datenauswertung.

Einmal in 24 Stunden umkreist *Venus Express* den Planeten auf einer stark elliptischen Umlaufbahn, die Flughöhe schwankt dabei zwischen 250 und 66000 Kilometer. „Durch den speziellen Orbit haben die Instrumente und Kameras besonders die südliche Venushalbkugel im Blick“, sagt Titov. Bei der Beobachtung der Atmosphäre hilft der Umstand, dass das Antlitz des Planeten im Ultravioletten (UV), anders als im sichtbaren Licht, durchaus viele Details zeigt.

Das ist zwar längst bekannt, aber die Planetenforscher rätseln immer noch, welcher Stoff diese ungleichförmige Absorption der UV-Strahlen verursacht. „Die unbekannte Substanz befindet sich wahrscheinlich in den Tröpfchen der Wolken aus Schwefelsäure“, erklärt Dmitriy Titov. Jedenfalls sei das myste-

riöse Material auch eine große Hilfe, denn „damit können wir die dynamischen Vorgänge in der Venusatmosphäre im UV-Licht gut verfolgen“.

Wie ist die Gashülle der Venus großräumig aufgebaut? Welche Veränderungen spielen sich dort ab? Antworten gibt die *Venus Monitoring Camera* aus Katlenburg-Lindau. Ihre Fotos der Südhalbkugel zeigen drei sehr unterschiedliche Zonen im Wolkenmeer der Venus. Nahe des Äquators ist die Sonneneinstrahlung am höchsten, dort fördern turbulente Konvektionsströmungen den dunklen UV-Absorber aus tiefen Schichten der Atmosphäre nach oben. Die Bilder dieser Breiten sind folglich geprägt von UV-dunklen Markierungen.

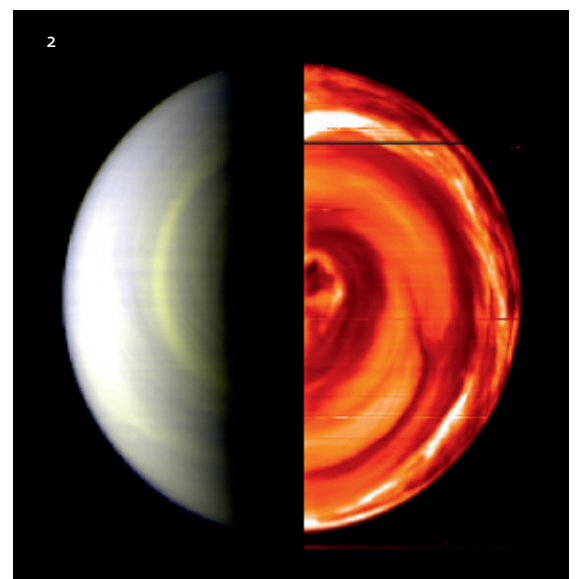
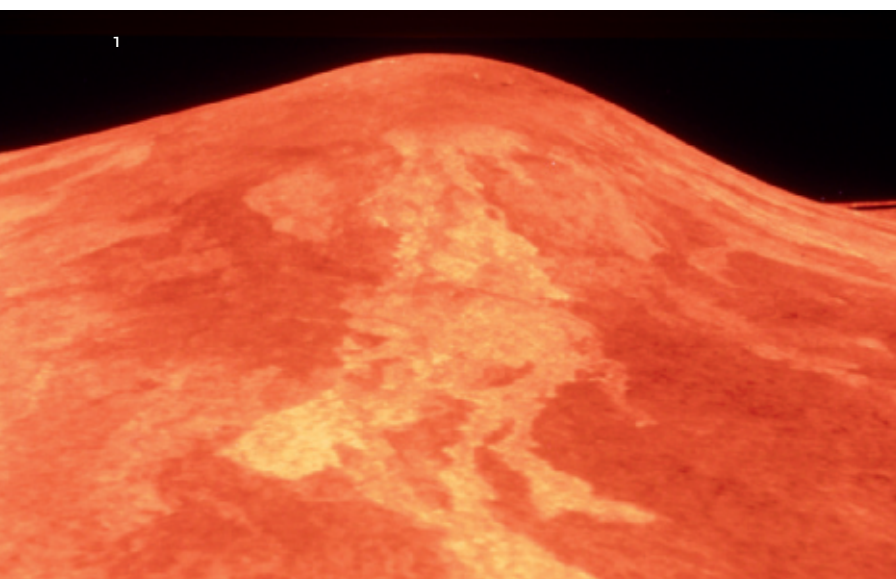
AEROSOLE REFLEKTIEREN EINEN GROSSTEIL DER STRAHLUNG

Anders weiter im Süden, jenseits von 40 Grad südlicher Breite: Dort sehen die UV-Augen von *Venus Express* lang gestreckte, streifige Wolkenformationen, die auf eine geordnetere, mehr laminaire atmosphärische Strömung schließen lassen. Diese geht in einen planetenumfassenden Kranz aus hellen, fast strukturlosen Wolken zwischen 50 und 70 Grad südlicher Breite über. Hier reflektieren vermutlich Aerosole einen

Großteil des Sonnenlichts, bevor es den UV-Absorber erreicht. Diese Zone kann man sich als Fluss aus vergleichsweise kühler Venusluft vorstellen, der das Polargebiet umströmt.

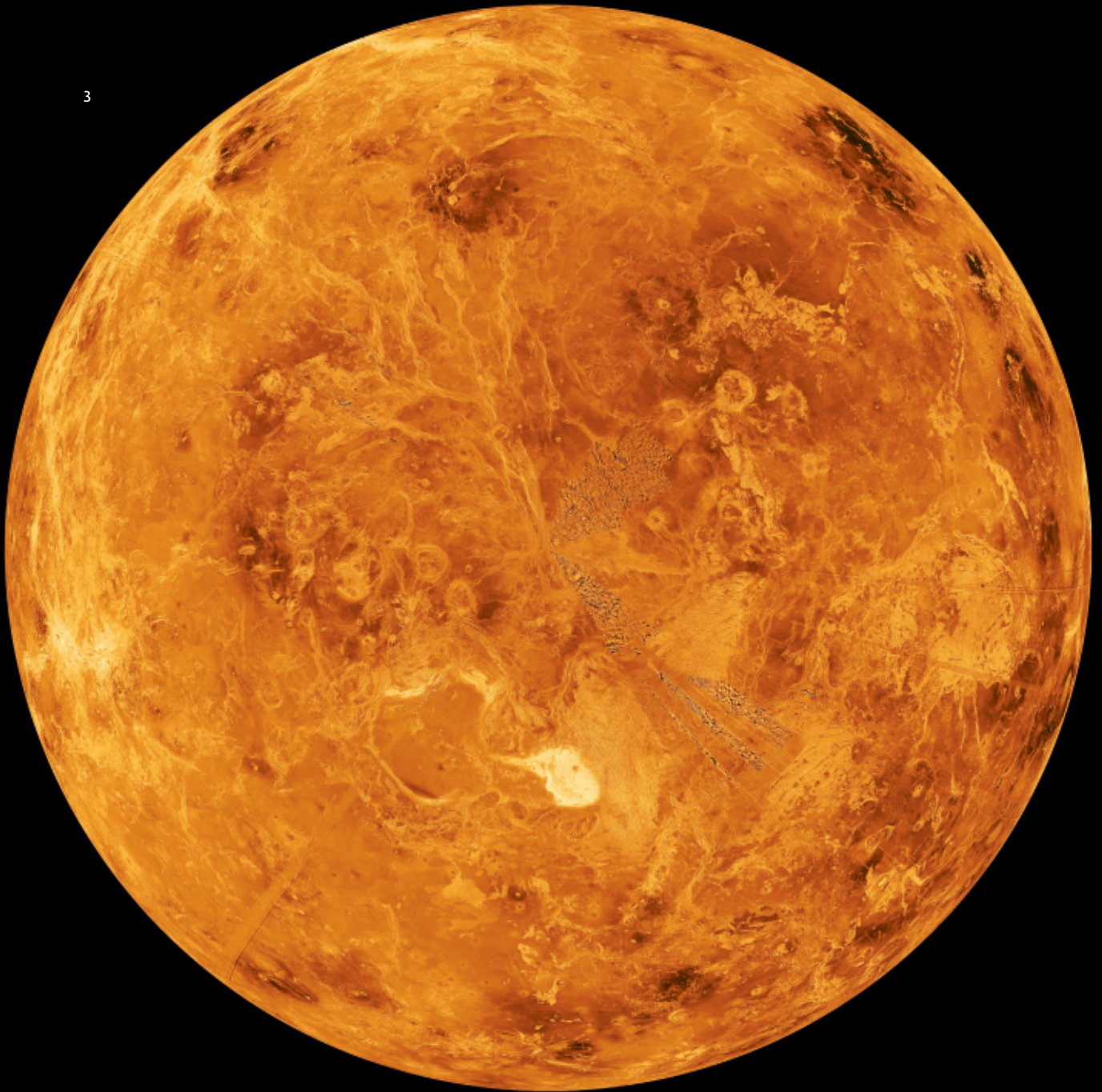
Die Polregion selbst bietet den Forschern seit dem Missionsbeginn ein eindrucksvolles Schauspiel: Dort tost ein gewaltiger Wolkenwirbel, der in zweieinhalb Tagen um den Südpol rotiert und den bereits die Vorgänger von *Venus Express* entdeckten. Nie zuvor konnte er in der jetzigen Detailfülle studiert werden. Manchmal ähnelt er einem irdischen Hurrikan. Bisweilen scheint er jedoch zwei Zentren aufzuweisen, Venusforscher nennen sein Auge *polar dipol*. „Innerhalb kurzer Zeit ändert das Auge des Wirbelsturms so stark sein Aussehen, dass mitunter ein Dipol nicht mehr erkennbar ist“, sagt Max-Planck-Forscher Titov.

Die großräumige Struktur der Gashülle auf der Südhemisphäre ist typisch für den gesamten Planeten, denn auch im Norden ist die Atmosphäre ähnlich aufgebaut. Wegen der speziellen Umlaufbahn der Sonde eignet sich die Nordhalbkugel für Detailstudien. So konnte die Katlenburger Kamera dort etwa *wave trains*, wellenartige Wolkenstrukturen, ablichten, die es in ähnlicher Form auch auf der Erde

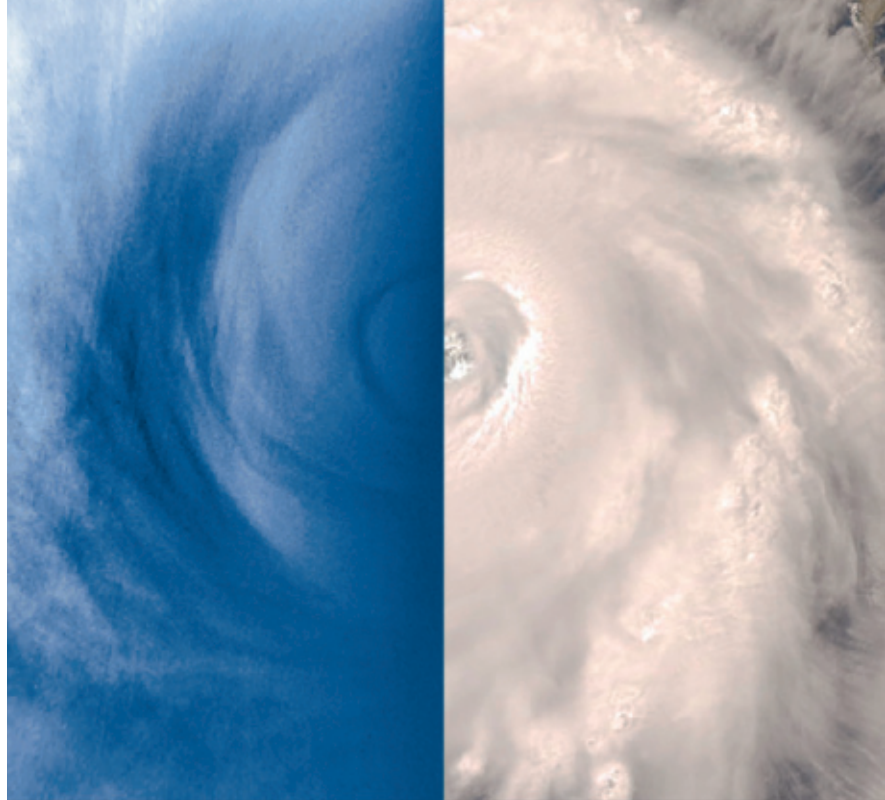
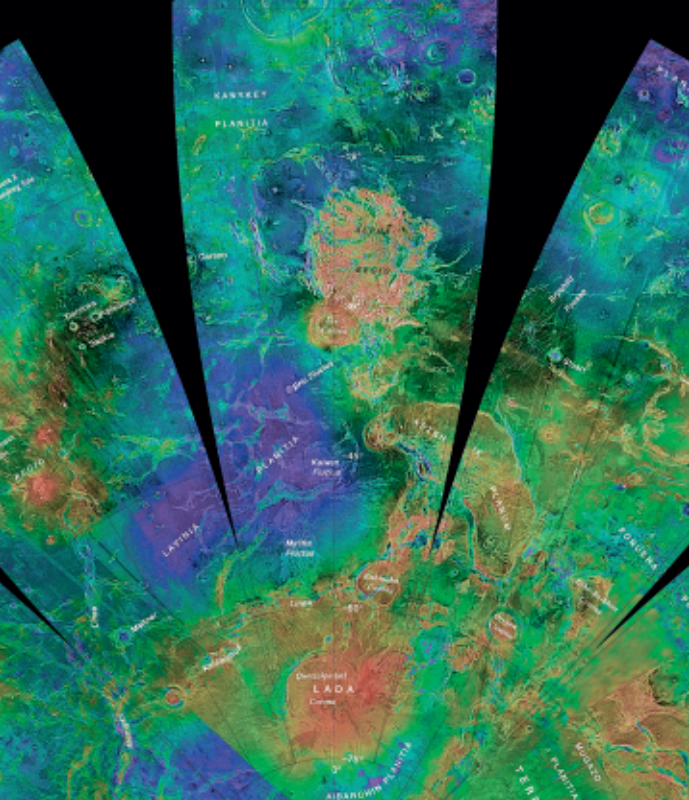


Fotos: Magellan Project/PL/NASA (links), ESA/MPS

3



- 1 Die Venuslandschaft wurde von Vulkanen geformt, wie dem rund 2000 Meter hohen Sif Mons. Die geologische Geschichte beschäftigt heute die Planetologen.
- 2 Zwei Ansichten des wolkenverhangenen Venus-Südpols. Das linke Teilbild zeigt die Gashölle bei Tag im reflektierten Sonnenlicht, das rechte Teilbild nachts bei thermischer Strahlung. Auf beiden Ansichten sieht man Spuren eines mächtigen Wirbelsturms.
- 3 Die Venus ohne Schleier: Solche Ansichten der nackten Planetenkugel gelingen nur mit Radarinstrumenten.



links | Ein Teil der Südhemisphäre. Die Farbgebung beruht auf Höhenmessungen: Blaue Flächen zeigen tief liegende Regionen der Venus an, grüne die mittleren Lagen, und in ockerfarbenen und braunen bis orangefarbenen Tönen sind die am höchsten gelegenen Gebiete dargestellt.
rechts | Schwestern in Aufruhr: Das linke Bild zeigt einen Wirbelsturm auf der Venus, das rechte zum Vergleich den irdischen Hurrikan Frances.

gibt. Stück für Stück muss nun auch der rätselhafte UV-Absorber sein Geheimnis preisgeben.

„Durch Vergleich zwischen den UV- und Infrarotfotos solcher Wolken konnten wir mit unserer Kamera mehrfach bestätigen, dass der unbekannte UV-Absorber auch leicht im nahen Infrarotlicht absorbiert“, erklärt Wojciech Markiewicz, der am Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung das Kamera-Experiment leitet. Sein Kollege Titov dazu: „Zwar werden viele Stoffe als Ursache für die UV-Absorption diskutiert, womöglich ist es jedoch einfach eine besondere Modifikation des Schwefels.“

Obwohl der etwa 25 Kilometer dicke Wolkenteppich in den sichtbaren Wellenlängen des Spektrums den Blick zur Oberfläche verstellt, kann die Kamera sogar Details am Boden ausmachen. Und das geht so: Selbst auf der Nachtseite ist die Venusoberfläche noch über 400 Grad heiß, das bedeutet, die Oberflächengesteine geben Wärmestrahlung im unsichtbaren Infrarot ab. Ein Teil dieser Strahlung kann die Wolkendecke durchdringen. „Die Auflö-

sung der Bilder ist zwar durch die dicke Gashölle stark eingeschränkt“, erklärt Markiewicz. „Dennoch erfahren wir sehr viel über die Oberfläche.“

GLOBALE VULKANAUSBRÜCHE GEBEN RÄTSEL AUF

Solche Mosaikfotos, die mehr als 1000 Einzelbilder umfassen können, zeigen die Temperaturvariationen in den Venuslandschaften: Wie auf der Erde sind die Niederungen wärmer als die Berge, die bis zu zwölf Kilometer emporragen. Auf einem Fünf-Kilometer-Gipfel liegen die Temperaturen beispielsweise 40 Grad unter denen der Ebene. Mit solchen Studien wollen die Planetologen auch mehr über die Mineralien der Venuskruste erfahren. Nach den gängigen Theorien entstand die Oberfläche durch planetenweite Vulkaneruptionen. Diese rätselhafte globale Katastrophe suchte die Venus vor etwa 500 bis 600 Millionen Jahren heim.

Vulkanismus in großem Stil enthüllte bereits in den 1990er-Jahren die Sonde *Magellan*, die rund 98 Prozent der Venusoberfläche kartierte. Auf ihren

Radarbildern zählten die Forscher rund 1000 Vulkane. Sollten noch heute Venusvulkane Feuer spucken, so könnten die VMC-Kamera und das *Visible and Infrared Thermal Imaging Spectrometer (VIRTIS)* ihnen auf die Schliche kommen. Die Suche danach geht weiter.

Zurück zum Himmel über der Venus, dem eigentlichen Forschungsobjekt der Mission. Bilder einzelner Wolkenformationen, abgelichtet von VMC und VIRTIS, nutzen die Planetologen, um die Windverhältnisse in der stürmischen Atmosphäre zu messen. Dabei lassen sich in den verschiedenen Wellenlängen Bewegungen aufspüren, die in unterschiedlichen Höhen des mehrschichtigen Wolkensystems stattfinden. Erstmals gelangen so umfassende 3D-Studien der Venusstürme: In 66 Kilometer Höhe rasen die Wolken bis zu 370 Kilometer pro Stunde, immerhin das Dreifache irdischer Hurrikans; tiefer unten, 45 bis 47 Kilometer über dem Boden, werden immer noch 210 Stundenkilometer gemessen.

Mit solchen Studien wollen die Forscher klären, was die „Superrotation“ der Venusatmosphäre antreibt. Diese

rasante Bewegung lässt die höhere Gas-hülle in nur vier Erdtagen den gesamten Planeten umrunden. Sie vollzieht sich in derselben Richtung wie die Eigenrotation der Venus. Ein Venustag dauert wiederum ungewöhnlich lange: Für die Drehung um die eigene Achse benötigt die ungleiche Planetenschwester 243 Erdtage – fast 19 Erdtage mehr als für den vollständigen Sonnenlauf. Der Venustag dauert also länger als das Venusjahr.

Die Eigendrehung im Schnecken-tempo ist wahrscheinlich eine Ursache für einen weiteren wichtigen Unterschied zur Erde: Venus hat kein globales Magnetfeld. Wahrscheinlich beeinflusste dieser Umstand auch ihre Klimageschichte, insbesondere das Schicksal des Wassers, das die junge Venus gemeinsam mit Erde und Mars als Mitgift der Planetenbildung erhielt. Übrigens gibt es auf der Venus auch keine Plattentektonik.

Anders als diese beiden terrestrischen Planeten ist die Venus mittlerweile jedoch extrem trocken. Zwar findet sich Wasser als Spurengas in der Venusluft, es macht aber lediglich 30 ppm (*parts per million*) aus. Würde sich alles heutige Wasser der Venus am Boden sammeln und über die Oberfläche verteilen, wäre dieser Ozean nur drei Zentimeter tief, der Vergleichswert für die Erde beträgt fast drei Kilometer.

Einen Hinweis auf eine feuchtere Venusjugend lieferte bereits die amerikanische Sonde *Pioneer-Venus*, die vor drei Jahrzehnten ihr Ziel erreichte. Ihr Massenspektrometer untersuchte die Isotope des Wasserstoffs in den Tröpfchen der säurehaltigen Venuswolken. Neben dem gewöhnlichen Wasserstoff (chemisches Symbol: H) maß *Pioneer* auch die Konzentration von Deuterium (D), dem sogenannten Schwere Wasserstoff. Deuterium macht im Wasser der irdischen Weltmeere nur 0,015 Prozent des dort gebundenen Wasserstoffs aus.

Die Messungen von *Pioneer-Venus* ergaben jedoch, dass das Verhältnis D zu H auf der Venus rund 120-mal stär-

ker zum Deuterium verschoben ist. Die Erklärung: Seit ihrer Entstehung hat die Venus überproportional die leichten H-Atome ins Weltall verloren. Das schwerere Deuterium blieb bevorzugt im Schwerefeld gefangen – eine allmähliche Anreicherung zugunsten dieses Isotops. Der D-Überschuss, den *Venus Express* bestätigte, deutet also auf höhere Wassermengen der jungen Venus hin.

ULTRAVIOLETTES LICHT WÜTET IN DER HOCHATMOSPHERE

Bis heute dauert der Verlust atmosphärischer Gase an. Mit dem ASPERA-Instrument (*Analyzer of Space Plasma and Energetic Atoms*) konnte *Venus Express* den Verlust von Wasserstoff und Sauerstoff nachweisen, wobei auf jedes O-Atom etwa zwei H-Atome kommen – dieselben Mengenverhältnisse wie im Wassermolekül. Markus Fränz, der im Katlenburger Institut die ASPERA-Daten auswertet, glaubt nicht an einen Zufall: „Physikalische Modelle erklären, dass H₂O in der Hochatmosphäre vom ultravioletten Sonnenlicht aufgebrochen und ionisiert wird. Die H- und O-Ionen können in den Welt-raum entweichen. Dieser Verlust passiert hauptsächlich auf der Nachtseite des Planeten.“

Mittlerweile wurden auch abgehende H-Ionen von der Tagseite gemessen. Welche Prozesse in der Vergangenheit und heute die Atome aus den Gashüllen der Planeten treiben, müssen die Forscher noch ermitteln. Hauptverdächtiger ist der Sonnenwind, ein geladener Partikelstrom, der von der Sonne ausgeht und Atome und Ionen so stark beschleunigen kann, dass sie das Schwerefeld verlassen. Fränz: „Momentan ist die Sonnenaktivität in ihrem Minimum, das gilt auch für den Sonnenwind. Beides ändert sich aber in einem elfjährigen Rhythmus. In den kommenden Jahren wollen wir die Erosion der Atmosphäre bei zunehmender Sonnenaktivität studieren.“

Für gesicherte Antworten auf die großen Fragen der Venusforschung ist es noch zu früh. Trotzdem wagt Dmitriy Titov einen Zwischenbescheid: Die Venus sei gar nicht so mysteriös, wie es noch in den frühen Jahren der Planetenerkundung erschien. „Sie startete einst ähnlich wie die Erde. Jedoch wurde ihr Kohlenstoff-Inventar nicht wie bei uns durch die Wirkung der Ozeane in Karbonatgestein gebunden. Der Kohlenstoff blieb als CO₂ in der Atmosphäre. Dort kam ein sich selbst verstärkender Treibhauseffekt in Gang.“

In der anschwellenden Hitze verdampfte alles Wasser und ging ins Weltall verloren. Ähnliche Prozesse sind auch von der Erde bekannt, auf der Venus haben sie sich allerdings bis auf ein bizarres Niveau verstärkt. Dieses Bild durch Langzeitmessungen zu erhärten, wird die Aufgabe der kommenden Jahre sein – viel Arbeit für *Venus Express* und ihre bereits geplanten Nachfolgesonden. ◀

GLOSSAR

Isotop

Atome, deren Kerne gleiche Protonenzahl (und damit identische Kernladungszahl) besitzen, jedoch eine unterschiedliche Anzahl von Neutronen.

Plattentektonik

Sichtbarer Ausdruck der Plattentektonik auf der Erde sind Bewegungen der Lithosphärenplatten, gemeinhin als Kontinentalverschiebung bezeichnet. Die Plattentektonik bewirkt etwa die Entstehung von Faltengebirgen sowie Phänomene wie Vulkanismus oder Erdbeben.

Treibhauseffekt

Energiereiche UV-Strahlung der Sonne durchdringt eine Planetenatmosphäre, während langwellige Wärmestrahlung gleichsam gefangen bleibt. Bei der Erde verhindert vor allem das Kohlendioxid in der Atmosphäre das Entweichen der Wärme in den Weltraum. Beim Planeten Venus ist der Treibhauseffekt noch wesentlich stärker.

Zeugen kosmischer Heimatkunde

Lange führten sie im Sonnensystem ein Schattendasein: die Asteroiden und Kometenkörper. Sie sind sehr klein, lichtschwach und deshalb schwer zu beobachten. Doch sie können viel Spannendes über die Entstehung des Sonnensystems erzählen. Astronomen aus dem **Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung** in Katlenburg-Lindau rekonstruieren diese kosmische Geschichte.

TEXT **THOMAS BÜHRKE**

Als Star am Himmel trat im Frühjahr 1997 der strahlend helle Hale-Bopp auf. Kometen faszinieren Forscher und Laien gleichermaßen.

Im Sonnensystem herrscht eine Ordnung wie im Ancien Régime: Im Zentrum steht der Sonnenkönig, um den sich alles dreht. Die erdähnlichen Planeten Merkur, Venus, Erde und Mars kreisen, wie der Hofadel, am nächsten um die Sonne. Weit draußen, dem Landadel ähnlich, führen die Gasriesen Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun ihr Dasein.

Doch zahlenmäßig machen die Asteroiden und Kometen die große Masse im Sonnensystem. Wie das einfache Volk in der Geschichtsschreibung wurden sie von den Astronomen lange vernachlässigt. Zu Unrecht, denn diese Kleinkörper können viel darüber verraten, wie das Sonnensystem zu dem wurde, was es heute ist. Diese Geheimnisse entlocken ihnen Astronomen aus dem Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung mit Teleskopen, Simulationen oder mit Raumsonden, die sie zu den Himmelskörpern schicken.

Die meisten Asteroiden, nämlich wohl mehr als eine Million mit einem Durchmesser von einem Kilometer oder mehr, ziehen im Hauptgürtel zwi-

schen Mars und Jupiter ihre Bahnen um die Sonne. Ihr Abstand zu unserem Stern beträgt zwischen 2,0 und 3,3 Astronomischen Einheiten, wobei eine Astronomische Einheit (AE) der Entfernung Sonne-Erde entspricht. Jenseits von Neptun fristen im Kuipergürtel weitere Objekte aus Eis und Gestein ihr Dasein. Pluto ist der zweitgrößte Vertreter von ihnen, seit ihn die Internationale Astronomische Union vor drei Jahren wegen mangelnder Größe aus dem planetarischen Adel verstoßen und zum Zwergplaneten degradiert hat. Der Kuipergürtel erstreckt sich über eine Entfernung von 30 bis 50 Astronomischen Einheiten.

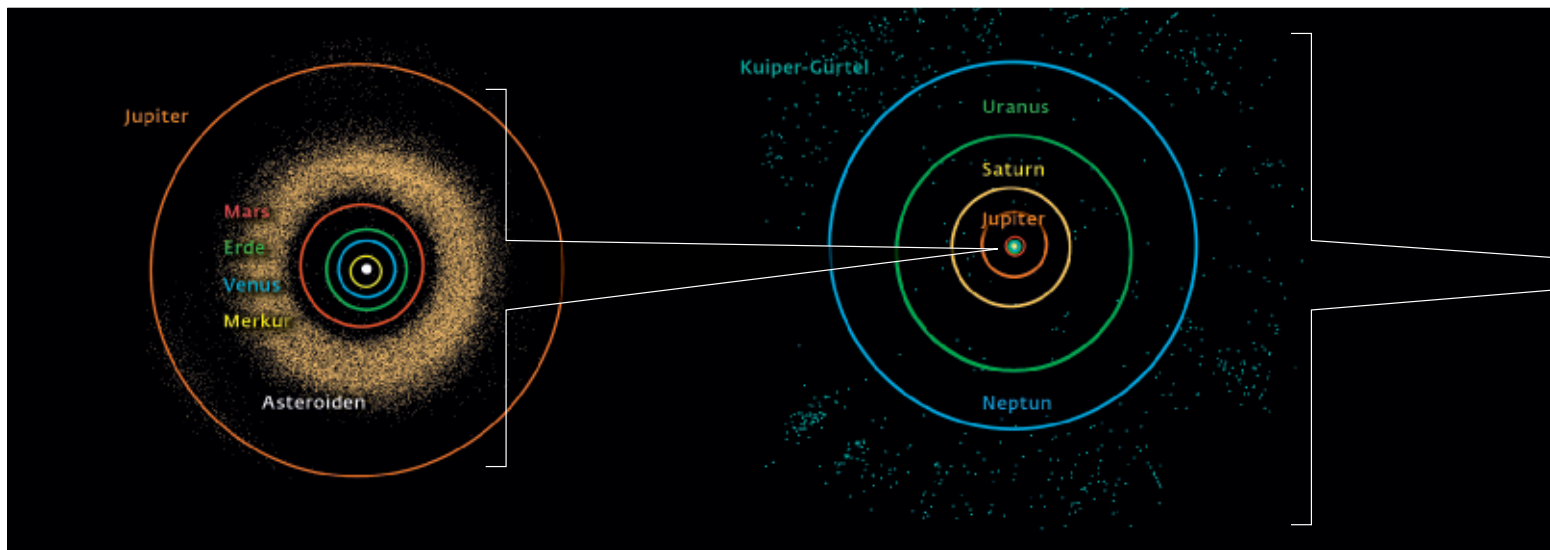
BAUSCHUTT AUS DER FRÜHZEIT DES SONNENSYSTEMS

Nach Schätzungen der Astronomen umschwirren mindestens 70 000 Kuiperobjekte mit mehr als hundert Kilometer Durchmesser die Sonne, mehr als 1300 von ihnen wurden in den vergangenen knapp zwei Jahrzehnten entdeckt. Es handelt sich um übrig ge-

bliebenes Baumaterial aus der Frühzeit des Sonnensystems, das sich nie zu einem großen Planeten zusammengelagert hat.

Doch damit ist der Rand des Sonnensystems noch lange nicht erreicht. Ganz weit draußen, bis zu einer Distanz von mehreren zehntausend Astronomischen Einheiten, und mit keinem Teleskop auffindbar, ziehen in der Oortschen Wolke weitere eiskalte Körper auf ihren Bahnen dahin. Aus diesem Reservoir kommen langperiodische Kometen, die nur alle paar tausend Jahre im inneren Sonnensystem erscheinen.

Kurzperiodische Kometen, die im Abstand von maximal etwa 200 Jahren am Himmel auftauchen, gehörten dagegen einst zum Kuiperring. Wurde einer von ihnen durch die Schwerkraftwirkung eines Planeten aus diesem Gebiet herauskatapultiert, so näherte er sich auf einer elliptischen Bahn der Sonne. Bei der ständig steigenden Temperatur verlieren diese Körper immer mehr Gas und Staub und erscheinen als Kometen am Nachthimmel. >



Ganz ungefährlich ist die Reise der Asteroiden und Kometen nicht: Die meisten Körper ziehen in der kosmischen Ordnung zwar seit Jahrmilliarden ihre Bahnen um die Sonne, aber sie können mit einem Planeten, auch der Erde, zusammenstoßen. Schon Isaac Newton fragte sich im 17. Jahrhundert, ob das System wirklich stabil ist. Er konnte es nicht beweisen und hielt ein göttliches Eingreifen für notwendig, sollte das kosmische Uhrwerk einmal aus dem Takt geraten.

Auch wenn Newton wahrscheinlich die falschen Konsequenzen zog, seine Zweifel an der Beständigkeit des Sonnensystems waren gar nicht so abwegig. In ferner Zukunft wird zwar vermutlich kein Planet durch die Schwerkraftwirkung der anderen Planeten aus seiner Bahn geworfen. Aber in

den vergangenen Jahren mehren sich die Anzeichen, dass das Sonnensystem keinesfalls von Beginn an seine heutige Struktur besaß. „Es gibt gute Gründe für die Annahme, dass die großen Planeten anfänglich über weite Strecken gewandert sind, bevor sie ihre derzeitigen Bahnen eingenommen haben“, sagt Hermann Bönhardt vom Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in Katlenburg-Lindau.

Demnach hat sich unser Sonnensystem in seiner wilden Jugend gewissermaßen zurechtgerüttelt, bevor es zur Ruhe kam. Doch wie lässt sich das heute noch feststellen? Da helfen die kosmischen Vagabunden: „Anders als die meisten Planeten haben sich die Asteroiden und Kometenkerne seit ihrer Entstehung kaum mehr verändert. Sie beinhalten noch Informationen über

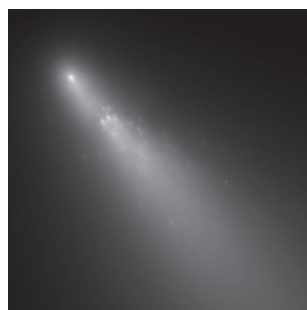
die Geburt des Sonnensystems“, sagt Bönhardt. Seit mehr als 25 Jahren beschäftigt sich der Wissenschaftler mit diesen Himmelskörpern und versucht ihnen ihre Geschichte zu entlocken.

FARBEN UND UMLAUFBAHNEN HÄNGEN ZUSAMMEN

Ursprünglich nahmen die Astronomen an, dass die Objekte im Kuipergürtel dort entstanden, wo man sie heute noch findet. Dann sollten sie alle etwa dieselben Eigenschaften und ähnliche Oberflächenfarben aufweisen. Das ist jedoch nicht der Fall. „Überraschenderweise gibt es eine breite Vielfalt zwischen rötlichen und grau-weißen Körpern“, erklärt Bönhardt.

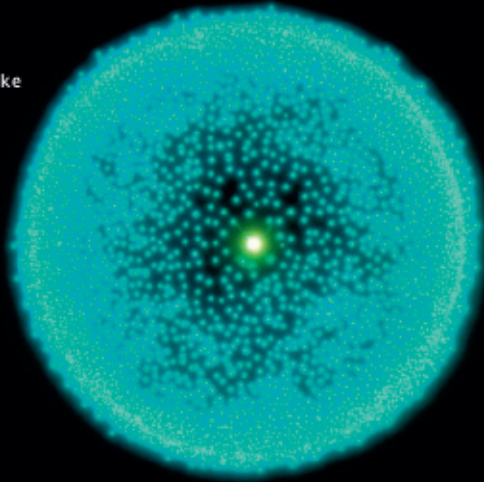
Als er im vergangenen Jahr zusammen mit Kollegen aus Frankreich und den USA etwa 170 Kuiperobjekte detailliert untersuchte, stieß er auf einen Zusammenhang zwischen den Farben und den Umlaufbahnen. Die Forscher unterscheiden heute mehrere Klassen von Kuiperobjekten. So gibt es etwa die „klassischen“ Körper, die sich in einem Entfernungsbereich von 40 bis 50 Astronomischen Einheiten auf nahezu kreisförmigen Bahnen bewegen. Diese Objekte sehen, wie die Studie zeigte, überwiegend rötlich aus. Eine andere Gruppe – die sogenannten gestreuten Kuiperobjekte – bewegen sich hinge-

Kleinzeug im Fokus: Planetoiden (links der Asteroid Ida) und Kometen (rechts der zerbröselnde Schwassmann-Wachmann 3) bergen Informationen aus der Frühgeschichte des Planetensystems.



Fotos: NASA Jet Propulsion Laboratory (NASA-JPL) (oben, 2); Galileo Project, JPL, NASA (unten links); NASA, ESA, H. Weaver (APL/JHU), M. Mutchler and Z. Levey (STScI) (unten rechts)

Oortsche Wolke



Mit den acht großen Planeten und der Sonne ist unsere kosmische Heimat noch längst nicht komplett. Zwischen Mars und Jupiter umkreisen im sogenannten Hauptgürtel Millionen von Kleinplaneten – auch Asteroiden oder Planetoiden genannt – das Zentralgestirn. Jenseits der Bahn des Neptun fanden Forscher im Jahr 1992 den ersten Vertreter einer weiteren Zone von Kleinplaneten, den Kuipergürtel. Die Kometen dagegen, vereiste Schmutzbälle, halten sich in der Oortschen Wolke auf, die mehr als ein Lichtjahr ins Weltall hinausreicht.

gen auf elliptischen Bahnen und erscheinen überwiegend weiß. Wie lässt sich das erklären?

Bei Temperaturen unter minus 200 Grad Celsius sind die Oberflächen der Kuiperobjekte vorwiegend mit Wasser- und Methaneis bedeckt, das einem ständigen Beschuss energiereicher Teilchen und UV-Strahlung aus dem All ausgesetzt ist. Im Laufe von Jahrtausenden wandelt sich dadurch Methan in komplexere organische Verbindungen um, etwa in Tholine, die dem Himmelskörper einen rötlich-braunen Anstrich geben. So ließen sich die Farben der klassischen Kuiperobjekte erklären. Doch warum sind dann die gestreuten Körper eher weißlich?

KOSMISCHE KOLLISIONEN SETZTEN EIS FREI

Diese Objekte bewegen sich auf elliptischen Bahnen, was vermehrt zu Zusammenstößen untereinander führt. Bei solchen kosmischen Kollisionen wird frisches, weißes Eis aus dem Innern freigesetzt und lagert sich auf der Oberfläche ab. „Zusammenstöße spielen sicher eine große Rolle bei der Entwicklung der Kuiperobjekte“, sagt Bönnhardt. Aber ob sie alle Eigenschaften erklären können, ist noch offen. Diese Kleinkörper können sich natürlich auch aus unterschiedlichen Stoffen zusammensetzen.

Dass die Kuiperobjekte zudem mehrere Hauptgruppen bilden, die sich aufgrund ihrer Bahneigenschaften unterscheiden, ist bislang auch nur zum Teil verstanden. Vier dieser Familien werden heutzutage von der Schwerkraft der großen äußeren Planeten auf ihre Bahnen gezwungen. Doch für zwei weitere Gruppen liegt die Ursache vermutlich in einer turbulenten Frühphase unserer kosmischen Heimat.

Als sich im jungen Sonnensystem die Planeten gebildet hatten, bewegten sie sich in einer Scheibe um die Sonne, die auch sehr viele Kleinkörper unterschiedlicher Größe enthielt. Schon 1984 fanden der damals am Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung arbeitende Wing Ip und ein Kollege heraus, dass die großen Planeten mit ihrer gewaltigen Schwerkraft das Kleinzeug im Sonnensystem hin und her geschleudert haben müssen. Doch ganz unberührt blieben auch die Planeten davon nicht. Je nach Konstellation verloren oder gewannen sie bei diesen Vorgängen Energie und wanderten infolgedessen auf spiralförmigen Bahnen näher an die Sonne heran oder von ihr weg.

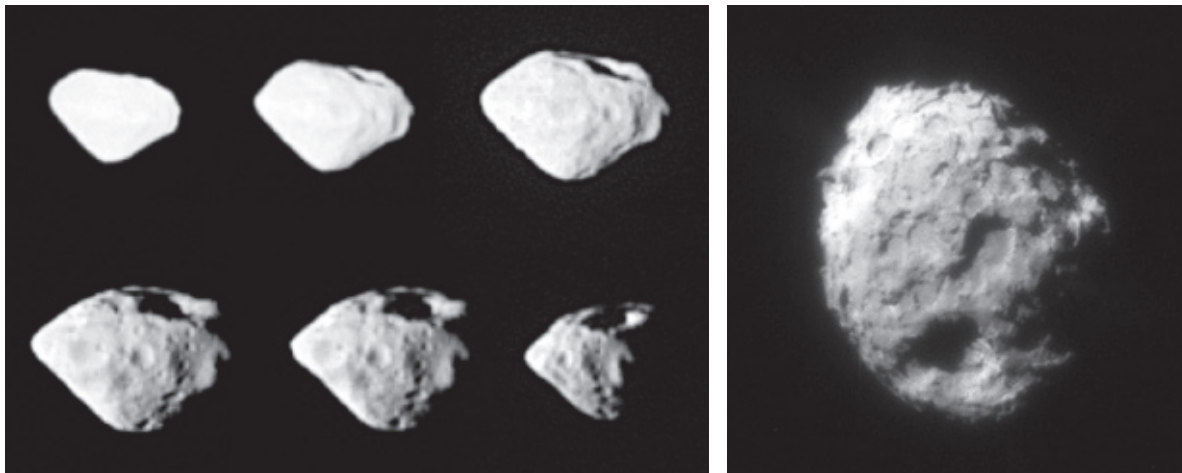
Diese Grundidee haben Theoretiker des Observatoriums Nizza vor vier Jahren in aufwendigen Computersimulationen durchgespielt. Dabei gelang ihnen eine Aufsehen erregende Entde-

ckung. Durch die Wechselwirkung mit den Kleinkörpern bewegte sich Jupiter an die Sonne heran, während Saturn, Uranus und Neptun nach außen driften. Neptun riss dabei einen Schwarm von Kleinkörpern mit sich, die man nun in ganz bestimmten Umlaufbahnen im Kuipergürtel wiederfindet. Auch die Existenz einer anderen Gruppe lässt sich mit diesem Planetenbillard recht gut erklären.

ALS DIE INNEREN PLANETEN HEFTIG BOMBARDIERT WURDEN

Dieses Nizza-Modell trifft noch eine weitere Vorhersage. Während der Planetenwanderung gab es mit großer Wahrscheinlichkeit eine Phase, in der Saturn für einen Sonnenumlauf genau doppelt so lange benötigte wie Jupiter. Bei dieser sogenannten 1:2-Bahnresonanz wurde die Schwerkraft-Wechselwirkung zwischen diesen beiden Körpern maximal, und die Bahnen verformten sich in kurzer Zeit zu Ellipsen.

Auf elliptischen Bahnen kreuzten die Planeten aber häufig die Kreisbahnen der nahen Kleinkörper, und diese wurden nun vermehrt auch in Richtung Sonne katapultiert. Die Folge war ein erhöhter Beschuss der inneren Planeten, zu der auch die Erde und der Mond gehörten. Auf diese Weise ließ sich das Große Bombardement (*Late*



Weltraumkartoffeln in allen Formen: Die Sequenz links zeigt unterschiedliche Ansichten des Planetoiden Steins, die während des Rendezvous mit dem europäischen Späher *Rosetta* entstanden. Rechts im Bild der Kern des Kometen Wild 2, den die US-Raumsonde *Stardust* aus der Nähe fotografiert hat.

Heavy Bombardement) erklären, bei dem die inneren Planeten rund 700 Millionen Jahre nach ihrer Entstehung von besonders vielen kosmischen Geschossen getroffen wurden.

KUIPEROBJEKTE – IM INFRAROTLICHT BEOBACHTET

So könnte das Nizza-Modell auf elegante Weise gleich mehrere Phänomene im Sonnensystem erklären. Ob es sich wirklich so abgespielt hat, muss die zukünftige Forschung erweisen. Hierfür hat Hermann Bönhardt zusammen mit Thomas Müller vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching und weiteren Astronomen ein Programm am kürzlich gestarteten Weltraumobservatorium *Herschel* der Europäischen Weltraumorganisation ESA initiiert. Es ist das größte jemals im All stationierte Teleskop. Damit wollen die Forscher im Infrarotlicht die Eigenschaften von möglichst vielen Kuiperobjekten ermitteln und haben dafür fast 400 Stunden Beobachtungszeit erhalten.

Die Folgen des Großen Bombardements lassen sich noch heute auf der Oberfläche des Mondes erkennen: Die großen, dunklen Mare zeugen von den schweren Treffern. Doch ohne Frage gab es auch vorher schon heftige Einschläge. Astronomen diskutieren des-

halb seit Langem über die Frage, ob Kometen auf diese Weise das Wasser auf die Erde gebracht haben könnten. Die Frage ist auch spannend, weil Kometen organische Moleküle in sich tragen. Erst kürzlich entdeckten amerikanische Forscher in dem Kometenstaub von Wild 2 die Aminosäure Glycin. Brachten die Schweifsterne also vielleicht auch Lebenskeime auf unseren Planeten?

Eine ebenso reizvolle wie gewagte Hypothese, die sich durchaus überprüfen lässt. Wasser ist nämlich nicht gleich Wasser. Ein Wassermolekül besteht aus zwei Wasserstoffatomen und einem Sauerstoffatom. Neben dem normalen Wasserstoff mit einem Proton im Kern existieren in der Natur zwei weitere Isotope: Deuterium und Tritium. Sie enthalten im Kern zusätzlich zu dem Proton noch ein beziehungsweise zwei Neutronen.

Im „Standardwasser“ auf der Erde kommt auf 6410 Atome Wasserstoff ein Atom Deuterium. In Kometen ließ sich dieses Verhältnis bislang nur in drei Fällen messen: bei Halley, Hyakutake und Hale-Bopp. Demnach enthielten sie einen deutlich höheren Anteil an Deuterium. Doch die Ergebnisse waren sehr ungenau. Im vergangenen Jahr gelang es einem Astronomenteam, dem Bönhardt angehörte, in dem Kometen Tuttle Deuterium spektroskopisch zu messen.

Dafür nutzten die Wissenschaftler den derzeit leistungsstärksten Spektrografen am *Very Large Telescope* der Europäischen Südsternwarte (ESO) in Chile. Das Ergebnis war eindeutig: Das Wasserstoff-Deuterium-Verhältnis betrug 2445:1 und war damit nicht einmal halb so groß wie auf der Erde, was gut mit den Beobachtungen der drei anderen Kometen übereinstimmte. Anders gesagt: In den Kometen hat sich Deuterium im Vergleich zur Erde erheblich angereichert.

INTERPLANETARE VAGABUNDEN ALS WASSERTRÄGER?

Damit spricht im Moment alles dafür, dass Kometen nur einen kleinen Teil des Wassers auf die Erde gebracht haben – wenn überhaupt. Abschließend beantwortet ist diese Frage aber noch nicht. „Wir müssen erst noch klären, ob das Isotopenverhältnis in allen Kometen gleich ist“, gibt Hermann Bönhardt zu bedenken.

Es bleibt also reichlich Forschungsbedarf bei den Kometen und Kuiperobjekten. Beobachtungen mit leistungsstarken Teleskopen sind eine Möglichkeit, hinfliegen die andere. Nachdem Europas Raumsonde *Giotto* im Jahr 1986 zum ersten Mal einen Kometen von Nahem fotografiert und untersucht hat, sind nur wenige weitere



Die Frage, ob die Kometen einst das Wasser auf die Erde gebracht haben, ist nach wie vor offen. Fest steht, dass es in der Frühgeschichte unseres Planeten sehr viele Kollisionen mit Kometen gab – am Irdischen Firmament müssen häufig prächtige kosmische Vagabunden aufgetaucht sein wie der Komet Machholz, der im Winter 2005 vor dem offenen Sternhaufen der Plejaden (oben) vorbeizog.



Punktlandung auf einer fremden Welt: So soll es aussehen, wenn die Sonde *Philae* im Jahr 2014 sanft auf dem Kometen Churyumov-Gerasimenko niedergeht. Damit wird es zum ersten Mal möglich, einen solchen Himmelskörper aus der Nähe zu studieren.

Raumschiffe zu einem Kometen geflogen: Die amerikanische Sonde *Stardust* hat den Kometen Wild 2 erreicht, in dessen Schweif Staub eingesammelt und im Januar 2006 zur Erde gebracht.

EIN PROJEKTIL BOHRT SICH IN DEN KOMETENKERN

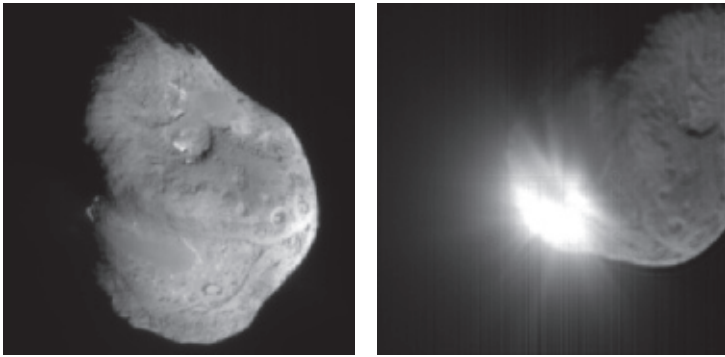
Besonders spektakulär verlief die Begegnung von *Deep Impact* mit Tempel 1. Denn das Raumschiff schoss ein 360 Kilogramm schweres Projektil in den rund drei Kilometer großen Kometenkern. Als dieses am 4. Juli 2005 einschlug, gab es eine heftige Explosion, bei der Material aus der Oberfläche herausgeschleudert wurde. Auf diese Weise war es erstmals möglich, Materie aus dem Innern eines Kometen zu studieren.

Da die Muttersonde selbst nur eingeschränkte Messmöglichkeiten besaß, hatte die damalige *Deep-Impact*-Wissenschaftlerin Karen Meech von der Universität Hawaii ein weltweites Beobachtungsprogramm initiiert. Teleskope von fast einhundert Observatorien waren auf den Kometen gerichtet, um das Licht der ausgeworfenen Materie zu studieren. „Bei der ESO standen dafür am 4. Juli alle Teleskope zur Verfügung“, erinnert sich Bönnhardt.

Ein Resultat hat den Forscher besonders gewundert: In dem aufgewirbelten Staub ließen sich Silikate in Kristallform nachweisen. Das war überraschend, weil diese nur bei hohen Temperaturen entstehen. Man nimmt aber an, dass sich Kometen in großer Entfernung von der Sonne, wo die Temperaturen weit unter

dem Gefrierpunkt liegen, gebildet haben. In dieser kühlen Region finden sich aber erfahrungsgemäß nur amorphe, also unregelmäßig geformte Silikate. Durch den Einschlag des Projektils von *Deep Impact* können die Kristalle nicht entstanden sein. „Dafür war dessen Energie viel zu gering“, sagt Bönnhardt. Wie kamen sie dann in den Kometen?

Die Mehrzahl der Astronomen vermutet heute, dass im solaren Urnebel heißes Material aus der Sonnennähe in die Außenbereiche transportiert worden sein muss, wo es dann in die Kometen eingebaut wurde. Astronomen des Max-Planck-Instituts für Astronomie in Heidelberg haben diese Hypothese vor wenigen Monaten bestätigt. Sie fanden in den Randbereichen der Staubscheibe eines fernen jungen



Deep Impact – keine Fiction, sondern Science: So hieß nicht nur ein Hollywood-Film, sondern auch eine US-Sonde, die im Juli 2005 zum Kometen Tempel 1 flog (links) und ein 372 Kilogramm schweres Projektil auf dessen Kern abfeuerte. Beim Einschlag wurde eine Wolke aus Staub und Gas ins All geschleudert (rechts). Die bei der Kollision freigesetzte Energie entsprach dem Äquivalent von 4,5 Tonnen TNT – der Komet blieb aber heil.

Sterns namens EX Lupi kristalline Silikate. EX Lupi befindet sich heute in einem Stadium, das unsere Sonne vor mehr als vier Milliarden Jahren durchlief. Die Verhältnisse sollten sich daher übertragen lassen. Auf welche Weise der Transport der Kristalle in die Außenbereiche der Scheibe stattfand, ist allerdings noch ungewiss.

KOMA UND SCHWEIF IM VISIER

Das nächste Highlight in der Kometenforschung wird die ESA setzen. Wenn alles nach Plan verläuft, erreicht die Raumsonde *Rosetta* im Jahre 2014 den Kometen Churyumov-Gerasimenko und schwenkt in eine Umlaufbahn ein. Nach einigen Monaten wird die Muttersonde dann die etwa hundert Kilogramm schwere Landesonde *Philae* abstoßen, die auf dem nur wenige Kilometer großen Kometenkern weich aufsetzen soll. Dann wird es zum ersten Mal möglich sein, einen Kometen vor Ort eingehend zu untersuchen.

Bis dahin vergeht noch etwas Zeit, aber für Hermann Böhnhardt und seine Kollegen haben die Vorbereitungen bereits begonnen. Sie studieren mit großen Teleskopen die Aktivität des Kometen, um etwa herauszufinden, in welcher Sonnenentfernung die gefrorenen Gase zu sublimieren beginnen und eine Koma oder einen Schweif erzeugen.

Rosetta selbst hat einen Test bereits mit Bravour bestanden. Im September vergangenen Jahres flog sie in nur 800 Kilometer Entfernung an dem Astero-

iden Steins vorbei. Alle Bordinstrumente wurden angeworfen, um sie viereinhalb Jahre nach dem Start erstmals für wissenschaftliche Zwecke zu testen.

Leider schaltete die Telekamera des *OSIRIS*-Kamerasystems neun Minuten vor der engsten Annäherung in den Sicherheitsmodus, sodass nur Bilder der Weitwinkel-Kamera zur Erde gelangten. Sie zeigen einen etwa fünf Kilometer großen Körper, der mit tiefen Kratern übersät ist. „Der Telekamera geht es jedoch gut“, versichert Horst Uwe Keller

vom Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, unter dessen Leitung *OSIRIS* entwickelt wurde.

Nun warten alle Kometenforscher gespannt auf *Rosettas* Ankunft bei Churyumov-Gerasimenko. Und wenn *Philae* auf dem Kometen landet, werden Wissenschaftler aus Katlenburg-Lindau auch mitfiebern. Sie entwickelten federführend das Instrument *COSAC*, das nach organischer Materie in dem kalten Brocken aus Eis und Gestein suchen soll. ◀

GLOSSAR

Asteroiden

Körper, auch Kleinplaneten oder Planetoiden genannt, die sich auf mehr oder weniger elliptischen Bahnen um die Sonne bewegen. Die kleinsten Asteroiden ähneln einem Steinchen, der größte ist Pallas mit 546 Kilometer Durchmesser. Derzeit sind rund eine halbe Million Asteroiden bekannt. Einige kreuzen die Erdbahn und können mit unserem Planeten zusammenstoßen. Dringt ein kleiner Asteroid in die Atmosphäre ein, glüht er als Meteor auf. Was dabei übrig bleibt und den Erdboden erreicht, heißt Meteorit.

Kometen

Körper aus Eis und Gestein, die sich auf stark elliptischen Bahnen um die Sonne bewegen. Gerät ein Kometenkern in Sonnennähe, so setzt er Gas frei. Es sammelt sich zunächst in einer Koma um den Körper an, wird dann aber vom Teilchenwind und der Strahlung der Sonne zu dem charakteristischen Schweif in die Länge gezogen.

Kuipergürtel

Ringförmige Asteroidenzone jenseits der Neptunbahn, die sich über einen Entfernungsbereich von 30 bis etwa 50 Astronomischen Einheiten erstreckt. Das erste Kuiperobjekt wurde 1992 entdeckt.

Oortsche Wolke

Kugelschalenförmiger Bereich, in dem Asteroiden das Sonnensystem in einer Entfernung von etwa 300 bis 60000 Astronomischen Einheiten (50000 Astronomische Einheiten entsprechen einem Lichtjahr) umkreisen. Aus ihr stammen die langperiodischen Kometen.

Sublimation

Der unmittelbare Übergang vom festen in den gasförmigen Aggregatzustand. Bei Kometen etwa sublimieren leicht flüchtige Substanzen auf der sonnenzugewandten Seite des Kerns und reißen ins Eis eingebettete Staubteilchen mit. So entstehen Koma und Schweif.

Gene für die Reisvielfalt

Eine Karte zeigt, welche genetischen Veränderungen bestimmte Eigenschaften bewirken – sie könnte die Züchtung neuer Sorten erleichtern



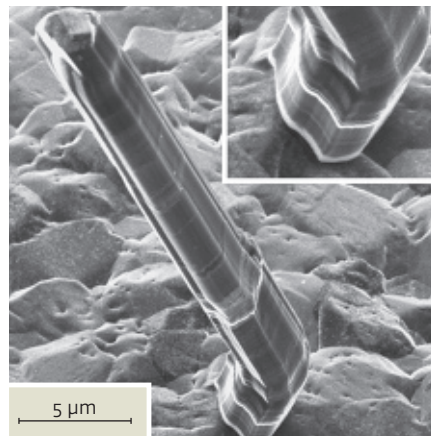
Neue Reissorten zu züchten könnte künftig leichter werden. Eine Datenbank verrät Züchtern jetzt nämlich, welche genetischen Veränderungen bestimmte Eigenschaften von Reispflanzen bewirken. Ein internationales Forscherteam, darunter Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Entwicklungsbiologie und des Friedrich-Miescher-Laboratoriums der Max-Planck-Gesellschaft in Tübingen, haben im Erbgut von 20 Reissorten 160000 Unterschiede aufgespürt und daraus eine Variationskarte erstellt. Viele dieser Veränderungen beeinflussen Stoffwechselforgänge, wie etwa die Produktion des Zuckers Amylose oder von Zellulose. Die Variationskarte könnte also helfen, die Gene zu identifizieren, die für die Züchtung ertragreicherer, nährstoffhaltigerer und trockenheitsresistenter Sorten wichtig sind. Sie verrät den Wissenschaftlern zudem, aus welchen Sorten die heutigen Reispflanzen gezüchtet wurden. So haben die ersten Reiszüchter offenbar Reispflanzen aus Indien und Afrika mit anderen Sorten gekreuzt, um sie widerstandsfähiger gegen Wassermangel und einen hohen Salzgehalt im Boden zu machen. (PNAS, 13. Juli 2009)

Die sichtlichen Unterschiede zwischen verschiedenen Reissorten lassen sich genauso mit Variationen im Erbgut erklären wie ihre Vorliebe für bestimmte Umweltbedingungen: etwa ob sie eher in der Tiefebene oder im Hochland gedeihen.

Üble Haare an der Wurzel gepackt

Ein Kurzschluss kann eine haarige Sache sein. Satelliten quitierten den Dienst, ein Rechenzentrum der amerikanischen Weltraumbehörde NASA lag immer wieder lahm und die US-Gesundheitsbehörde rief Tausende Herzschrittmacher zurück – weil Zinnhaare, die aus Lötstellen und Beschichtungen kupferner Elektronikbauteile hervorsprossen, die Geräte kurzschlossen. Ein Team von Wissenschaftlern des Max-Planck-Instituts für Metallforschung hat gemeinsam mit der Robert Bosch GmbH detailliert die Kräfte gemessen, die den metallischen Haarwuchs auslösen. Demnach muss der Druck der Zinnatome an der Wurzel eines Haars, im Fachjargon Whisker genannt, kleiner sein als weiter davon entfernt. Und dieser Druckunterschied

muss in der Zinnschicht in allen Richtungen bestehen. Dann tritt ein Effekt auf wie bei einer Zahnpastatube: Wenn man seitlich drückt, kommt oben



Zahnpasta raus. Der Druck baut sich auf, weil an der Grenze zwischen Zinn und Kupfer eine intermetallische Verbindung entsteht, die sich in die Zinnschicht hineinschiebt. Die Zinnhaare sind teilweise bis zu einigen Millimetern lang und nur wenige Mikrometer fein. Genau zu verstehen, wie sie wachsen, könnte helfen, sie zu vermeiden. (Applied Physics Letters, Juni 2009)

Ein Metallhaar, ganz groß: Die Aufnahme eines Ionenstrahlmikroskops zeigt, in welcher Gestalt ein Zinnhaar wächst.

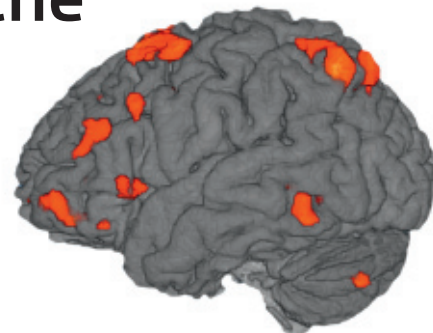
Formelsprache, schwere Sprache

Die Verarbeitung mathematischer Syntax erfolgt in bestimmten Hirnarealen

Auch Mathematik folgt einer Grammatik. Doch für die Analyse mathematischer Formeln braucht unser Gehirn deutlich mehr Gebiete als für das Verständnis der natürlichen Sprache, die wir sprechen. Um mathematische Grammatik, genauer gesagt Syntax, zu verarbeiten, aktiviert es auch Gebiete, die an Denksportaufgaben beteiligt sind. Mit dieser Erkenntnis erklären Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Kognitions- und Neurowissenschaften, warum wir dem Wetterbericht leichter folgen können als der Aussage:

Wenn a kleiner b und b kleiner c , dann a kleiner c . Die Forscher ließen ihre Probanden Formeln lesen, die keine Zahlen enthielten, um die Verarbeitung der mathematischen Syntax von der Verarbeitung der Zahlenwerte abzugrenzen.

Dennoch verriet im funktionellen Magnetresonanztomografen unter anderem der Sitz des Zahlensinns, der intraparietale Sulcus (IPS), Aktivität. Daneben arbeiteten an der Analyse der Formeln auch Areale um das Broca-Areal, das eigentliche Sprachzentrum, und in der linken vorderen Großhirnrinde.



+3.10 +4.49
-3.94 -3.94

Ganz schön beschäftigt ist das Gehirn mit mathematischer Grammatik. Das Bild zeigt die aktiven Areale, wenn es eine korrekte Formel verarbeitet – darunter der Sitz des Zahlensinns und Gebiete um das Sprachzentrum.

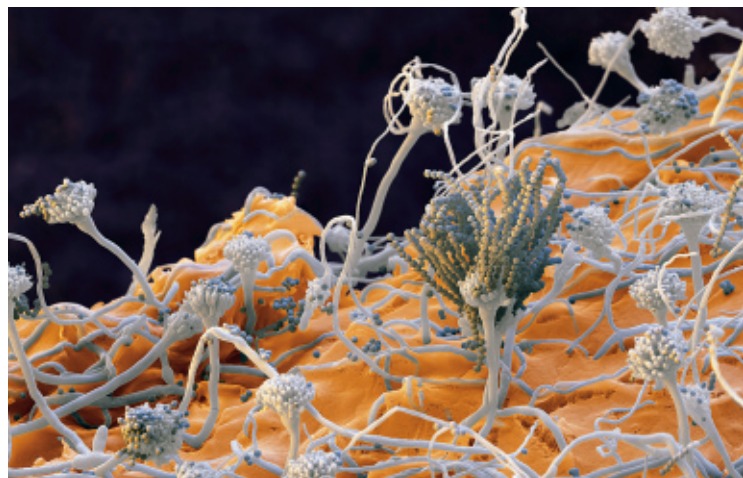
Der Lohn der Großzügigen

Großzügigkeit könnte der Musikindustrie aus der Misere helfen, in die illegale Musik-Downloads sie gebracht haben. Das Online-Musiklabel Magnatune macht ihr das vor. Es gewährt seinen Kunden schon vor dem Kauf freien und uneingeschränkten Streaming-Zugriff, sodass diese sich schon vor dem Kauf ein ausführliches Klangbild machen können. Mit dieser Großzügigkeit erklären Forscher des Max-Planck-Instituts für Ökonomik, warum sich auch die Käufer anschließend freigiebig zeigen: Sie bestimmen den Preis für ein Album in einer Spanne von fünf bis 18 Dollar selbst und zahlen im Schnitt 8,20 Dollar – 64 Prozent mehr als das geforderte Minimum und auch mehr als einen Preis von acht Dollar, den Magnatune empfiehlt. Wären Menschen, wie Ökonomen lange unterstellten, nur auf Gewinnmaximierung aus, würden sie nur das Minimum entrichten. Verschiedene Tests weisen dabei darauf hin, dass das Zahlungsverhalten stark von der festgesetzten Preisspanne und dem empfohlenen Kaufpreis abhängt. (JOURNAL OF ECONOMIC BEHAVIOR & ORGANIZATION, August 2009)

Foto: BASF (unten). Grafik: MPI für Kognitions- und Neurowissenschaften (oben)

Ein Himmel voller Pilze

In der Luft schweben Sporen von mehr Pilzarten als bislang gedacht. Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Chemie haben in einer DNA-Analyse mehrere 100 Pilzarten identifiziert. Ein Kubikmeter Luft enthält zwischen 1000 und 10 000 Pilzsporen. Um ihre Arten zu bestimmen, filterten die Forscher Fein- und Grobstaub aus der Luft und untersuchten ihn auf seinen genetischen Gehalt. Mit verschiedenen genetischen Angelhaken fischten sie dabei jeweils das Erbgut einzelner Pilzarten aus der Gen-Suppe. Die Forscher interessieren sich für die Pilzsporen vor allem, weil sie als biologische Aerosol-Partikel eine Rolle im Klima spielen. Sie können nämlich als Kondensations- und Kristallkeime wirken, an denen sich Wasser niederschlägt beziehungsweise gefriert. Die Sporen tragen daher dazu bei, dass Wolken,



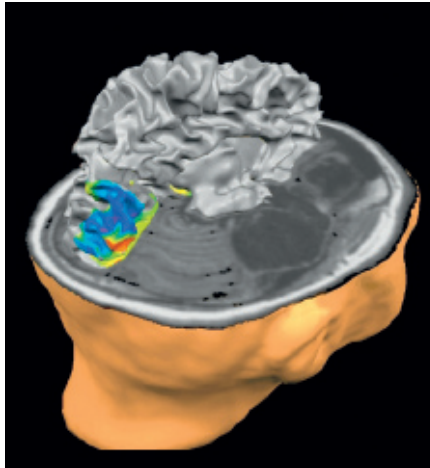
Eine Quelle für Pilzsporen: Als kleine Kugeln sitzen sie hier auf der Oberfläche des Schimmelpilzes *Emericella nidulans*, der sich verbreitet, indem er die Sporen in die Luft entlässt.

Nebel und Niederschlag entstehen. Pilzsporen geben aber auch Hinweise darauf, wie der Klimawandel Ökosysteme verändert. Und schließlich lösen sie Allergien aus und rufen bei Menschen, Tieren und Pflanzen Krankheiten hervor. Mit dem Wissen, welche Pilze in der Luft liegen, ließe sich dagegen vielleicht etwas unternehmen. (PNAS, 13. Juli 2009)

Volle Sicht mit einer Hirnhälfte

Eine Hemisphäre kann die Information von beiden Augen verarbeiten

Die Neurologen zweifelten sicher an ihrem Kernspin-Tomografen, als sie das Mädchen untersuchten, das sie der Welt unter dem Kürzel AH vorstellten: Auf dem Bild ihres Gehirns fehlte die rechte Hirnhälfte. Da ist es überraschend, dass AH nur unter leichten Bewegungseinschränkungen und Zuckungen litt. Selbst ihr Sehvermögen ist beinahe so gut wie bei einem Menschen mit einem kompletten Gehirn, wie Max-Planck-Wissenschaftler jetzt feststellten. Das ist erstaunlich. Denn normalerweise verarbeitet die linke Hirnhälfte die Bilder des rechten Sehfeldes und die rechte Hälfte jene des linken. „Der Fall, dass beim Menschen eine Hirnhälfte das gesamte Gesichtsfeld repräsentiert, wurde bislang noch nie beschrieben“, sagt Wolf Singer, Direktor am Max-Planck-Institut für Hirnforschung. Die Forscher vermuten, dass die rechte Hirnhälfte aufgrund einer Entwicklungsstörung etwa einen Monat nach der Befruchtung aufhörte zu wachsen. Zu diesem Zeitpunkt kann das Gehirn selbst einen solch massiven Schaden of-



Nur eine Gehirnhälfte besitzt die Patientin, die Neurologen als AH vorstellten. Ihr Sehvermögen ist fast normal, weil die eine Gehirnhälfte ausnahmsweise Information von beiden Augen verarbeitet.

fenbar noch kompensieren. Unter anderem auch deshalb, weil die Nervenfasern des linken Auges dann noch komplett zur linken Hirnhälfte umgelenkt werden können.

Fledermäuse sehen bunt

Auch notorischen Nachtschwärmern hilft ein Sinn für Farben. Forscher des Max-Planck-Instituts für Hirnforschung und der Universität Oldenburg haben in der Netzhaut zweier Fledermausarten, die in Mittel- und Südamerika beheimatet sind, Zapfen gefunden – Sinneszellen mit Pigmenten für das Farbsehen. Da sie nur bei Tageslicht nützlich sind, liegt der Anteil der Zapfen unter den Sehzellen auch nur bei höchstens vier Prozent, den Rest machen die Helligkeitsempfindlichen Stäbchen aus. Sie verschaffen den nachtaktiven Tieren auch bei schlechten Lichtverhältnissen eine gute Sicht, wenn auch nur in Schwarz-Weiß. Zwei Typen von Zapfen haben die Wissenschaftler unterschieden: L-Zapfen, die auf gelbgrünes Licht ansprechen, und S-Zapfen, die für UV-Licht empfindlich sind. Die UV-empfindlichen Sehzellen könnten den untersuchten Fledermäusen bei der Futtersuche helfen, da sie Pollen und Nektar aus Blüten sammeln und viele Blüten UV-Licht reflektieren. Zudem helfen die farbeempfindlichen Sehzellen den Tieren wahrscheinlich in der Dämmerung, sich zu orientieren und Raubvögel zu erkennen, zumindest ab Entfernungen über zehn Meter. Auf kürzere Distanzen verlassen sie sich ganz auf ihre Echoortung. (PLOS ONE, 28. Juli 2009)

Falter mit schwerem Gepäck



Testflug für die Wissenschaft: Am Monarchfalter wollen Forscher den Schmetterlingszug studieren.

Manche Monarchfalter werden künftig mit Ballast fliegen, wenn sie zwischen Mexiko und Kanada Tausende Kilometer zurücklegen. Forscher des Max-Planck-Instituts für Ornithologie und der Kansas University haben Schmetterlingen jetzt erstmals Radiotransmitter auf die Bäuche geklebt und sie anschließend zu Testzwecken auf die Reise geschickt – nachdem sie die Falter vorher ordentlich gepöppelt hatten. Die Sender sind zwar winzig, wiegen aber immerhin halb so viel wie die Falter selbst. Sie sollen den Forschern mehr über die Wanderungen der Monarchfal-

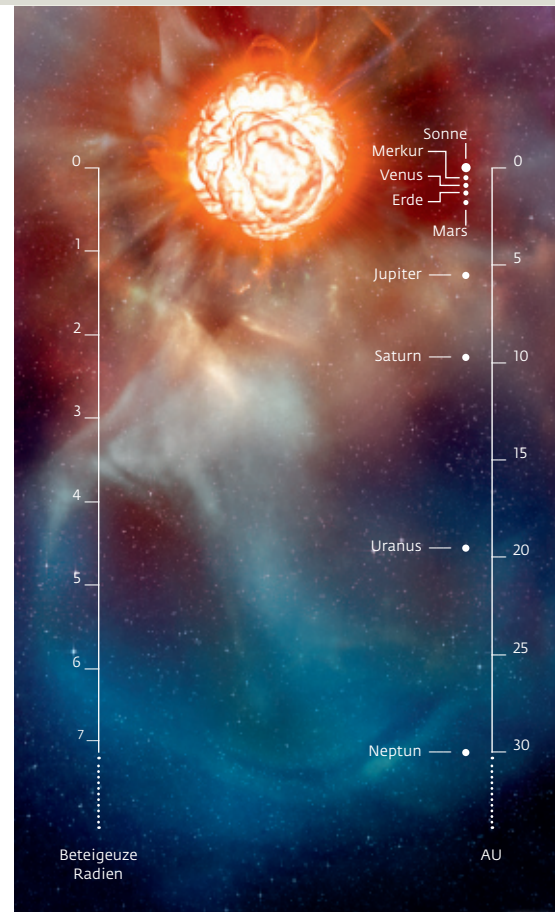
ter verraten. In zwei oder drei Generationen ziehen die Tiere von ihren Winterquartieren in der mexikanischen Sierra Nevada in den Norden, wobei einige die Großen Seen in Kanada erreichen. Die nächste Generation bewältigt im Spätherbst dann bis zu 3600 Kilometer zurück nach Mexiko. Die Daten über den Schmetterlingszug wollen die Forscher mit Wanderungen von Walen, Vögeln und Fledermäusen vergleichen. Möglicherweise lassen sich daraus Gesetze ableiten, mit denen sich Zugphänomene wie das der Wanderheuschrecken voraussagen lassen.

Ein Pulver gegen Energieverschwendung

Max-Planck-Chemiker wandeln Methan auf einfache Weise in Methanol um und könnten so bislang ungenutztes Erdgas zugänglich machen

Erdgas abzufackeln ist künftig vielleicht nicht mehr nötig. Denn Wissenschaftler der Max-Planck-Institute für Kohlenforschung sowie für Kolloid- und Grenzflächenforschung haben einen Katalysator entwickelt, der Methan, den Hauptbestandteil von Erdgas, einfach und effizient in Methanol umwandelt. Der pulverförmige Katalysator besteht aus einem stickstoffhaltigen Material, einem kovalenten triazinbasierten Netzwerk (CTF), in das Platinatome eingebaut sind. CTF wird von vielen Poren durchzogen und besitzt daher eine große Oberfläche, die dem Methan viel Platz bietet zu reagieren. Das macht den Katalysator so effizient, und weil es sich

um einen Feststoff handelt, lässt er sich auch einfach handhaben. Mit seiner Hilfe Methan in Methanol umzuwandeln, könnte sich auch dort lohnen, wo sich andere chemische Verfahren oder gar eine Pipeline nicht rentieren. Dass bei der Ölförderung weltweit jährlich mehr Erdgas verbrannt wird, als Deutschland verbraucht, muss dann vielleicht nicht länger sein. Zudem könnte das Verfahren helfen, unrentable Erdgasquellen zu erschließen. Die Ressourcen reichen nach derzeitigem Stand noch für 130 Jahre – doch momentan lohnt sich die Förderung nur aus Reserven, die nicht mehr viel länger als 60 Jahre sprudeln werden. (Angewandte Chemie Int. Ed., in press)

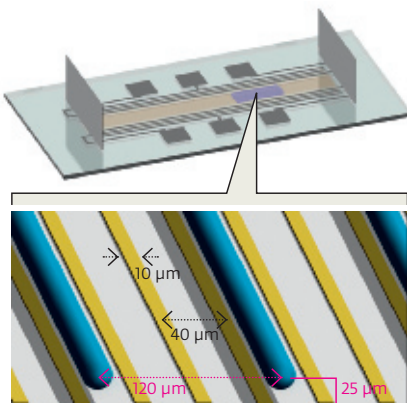


Als wabernder Riese präsentiert sich Betelgeuze. Die künstlerische Darstellung veranschaulicht, dass er die Dimension des inneren Sonnensystems übersteigt.

Moleküle in der Mikrofalle

Was Sam Meek und seine Kollegen mit Molekülen auf einem Chip anstellen, erinnert an das Können eines Fußballers: So wie der mit einer geschickten Beinbewegung einen Pass stoppt, den Ball einen Moment still hält und ihn dann mit

einem Schuss ins Tor versenkt, bremsen die Forscher des Fritz-Haber-Instituts der Max-Planck-Gesellschaft Kohlenmonoxid-Moleküle mit elektrischen Feldern, um sie dann wieder zu beschleunigen und in einem Detektor nachzuweisen – und das alles auf einer Strecke von fünf Zentimetern. Obendrein sind die Moleküle rund zehnmal schneller als ein stramm geschossener Ball. Über 1240 Goldelektroden steuern die Physiker, wie sich die elektrischen Felder, die Moleküle im Flug fangen, über den Chip bewegen. Mit ihrem Kunststück erleichtern sie Experimente mit Gasmolekülen, die ihnen auch neue Erkenntnisse über chemische Reaktionen in der Industrie oder der Atmosphäre liefern könnten. Dafür waren bislang sehr große und aufwändige Geräte nötig. (SCIENCE, 26. Juni 2009)



Sam Meek hat die Molekülfalle auf einem Chip konstruiert (links). Sie besteht aus 1240 Gold-Elektroden, die in dem Schema rechts als gelbe Streifen dargestellt sind. Mithilfe sechs verschiedener Spannungen erzeugen Meek und seine Kollegen zylindrische Potenzialfallen (blau), in denen sie Moleküle fangen.

Ein Gigant in Aufruhr

Es handelt sich um eine Art astronomische Sterbebegleitung: Ein internationales Team um Forscher des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie stellten einen sterbenden Riesenstern schärfer dar als je zuvor. Mit dem Very Large Telescope Interferometer (VLTI) auf dem Cerro Paranal in Chile nahmen sie Betelgeuze, der an der linken Schulter des Sternbilds Orion als heller, orangefarbener Stern funkelt, in den Blick. Auf diese Weise stellten sie fest, dass die Atmosphäre des Sterns Gasblasen wirft, die sich mit Geschwindigkeiten um 40 000 Kilometer pro Stunde auf und ab bewegen. Die Blasen stoßen explosionsartig Materie aus. Sie erreichen dabei Durchmesser von der Größe der Marsbahn um die Sonne. Die Blasen sind damit fast so groß wie Betelgeuze selbst – an der Stelle der Sonne würde er Merkur, Venus, Erde, Mars und beinahe auch noch Jupiter verschlucken. (Astronomy & Astrophysics 2009)

Vulkanwolke vom Winde verweht

Der Jetstream treibt Gas und Asche mit einer Geschwindigkeit von 540 Kilometer pro Stunde nach Europa

Der Messflug war schon fast vorbei und die *Leverkusen* setzte bereits zum Landanflug auf Frankfurt an, da schnappte sie noch ein paar besondere Luftproben auf. Das Flugzeug mit dem Messcontainer des Caribic-Projektes an Bord flog durch die Wolke, die der Vulkan Kasatochi eine Woche zuvor ausgestoßen hatte. Das stellten Forscher des Max-Planck-Instituts für Chemie in Mainz aber erst nachträglich fest. Der Vulkan liegt auf den Aleuten, einer Inselkette in Alaska. Bei seinem Ausbruch schleuderte er unter anderem 1,5 Millionen Tonnen Schwefeldioxid in mehrere Kilometer Höhe. Der Jetstream, ein Wind in über zehn Kilometer Höhe, musste die Wolke aus Gas und Asche anschließend mit 540 Kilometern pro Stunde nach Europa geblasen haben. Nur so konnten sich die Mainzer Chemiker die zehnfach erhöhte Schwefelkonzentration und die Menge feinsten Staubteilchen erklären, die sogar 1000-fach über der Norm lag. Neben Schwefel entdeckten sie große Mengen Kohlenstoff in der Wolke. Die Messergebnisse beleuchten die Rolle von Vulkan- ausbrüchen im Klima: Kohlenstoffhaltige Partikel, oft dunkler Ruß, heizen die Atmosphäre potenziell auf, weil sie Sonnenlicht absorbieren. Schwefelhaltige Teilchen kühlen die



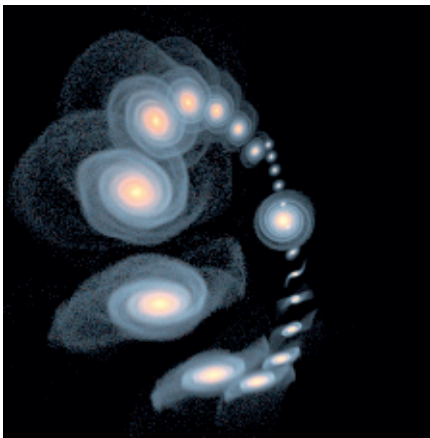
Der Vulkan Kasatochi, kurz nachdem er am 7. August 2008 ausgebrochen war. Die zuvor grüne Insel hat er dabei etwas vergrößert und in graue Asche gehüllt.

Atmosphäre dagegen eher, weil sie das Licht reflektieren. Die Ergebnisse lassen sich auch als natürlicher Testlauf für Überlegungen interpretieren, Schwefelsäure als Kühlmittel in der Atmosphäre auszubringen.

Gefräßige Andromeda

So nah dran am galaktischen Kannibalismus waren Astronomen noch nie. Ein internationales Team, dem auch Forscher des Max-Planck-Instituts für Astronomie angehören, hat detaillier-

ter als bislang Sternströme um den Andromeda-Nebel beobachtet. Die Ströme zeugen davon, dass die Galaxie sich mit ihrer großen Schwerkraft kleinere Sternsysteme einverleibt hat. Das Projekt trägt den Namen Pandas, kurz für *Pan-Andromeda Archeological Survey*. Darin haben die Wissenschaftler Spuren von sechs kannibalischen Akten identifiziert, darunter die Reste von zwei bislang unbekanntem Opfern. Und am nächsten knabbert Andromeda auch schon, wie die Forscher festgestellt haben. Vom Dreiecksnebel, der bis dato als ungefährdeter Begleiter Andromedas galt, ragt nämlich ein Sternenschweif zu ihr herüber und deutet auf eine vergangene Kollision. Simulationen des Teams belegen, dass Andromeda auch ihn auf lange Sicht verschlingen wird. (NATURE, 3. September 2009)



Das Ende im Blick: Eine Simulation zeigt, dass Andromeda – die kreisrunde Scheibe rechts von der Bildmitte – dereinst den Dreiecksnebel fressen wird. In der stroboskopischen Projektion verändert sich die Gestalt des Dreiecksnebels unter dem Gravitationseinfluss der größeren Galaxie.

Mit den Haien kam der Thymus

Sie dient als eine Art Trainingslager für Sondereinheiten des Immunsystems: In der Thymusdrüse spezialisieren sich die Lymphozyten, eine Gruppe der weißen Blutkörperchen, darauf, eine Immunantwort auf bestimmte Eindringlinge auszulösen. Wie das Organ im Laufe der Evolution entstanden ist, haben Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Immunbiologie in Freiburg nachgezeichnet. Demnach entstand es vor rund 500 Millionen Jahren auf Basis bereits bestehender Gene, und zwar bei Haien. In ihnen lässt sich erstmals ein Thymus nachweisen, und damit einhergehend trat in ihnen erstmals das entscheidende Foxn1-Gen auf. Foxn1 enthält den Bauplan für einen Transkriptionsfaktor, der die Bildung des Organs anstößt. Das alleine reichte aber nicht, denn für ihre Entwicklung müssen die un-

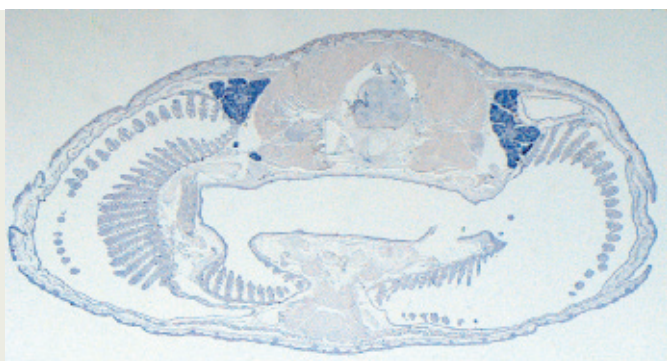
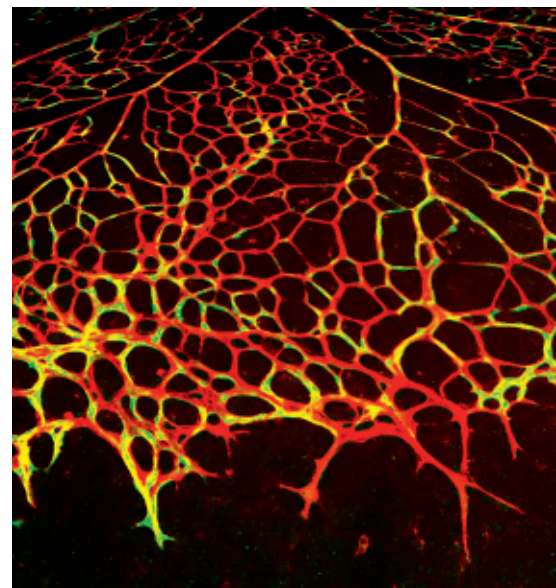
Schalter für Aderwachstum

Ein bekanntes Protein löst das Wachstum von Blutgefäßen aus und bietet Ansatzpunkte für Therapien gegen Gefäßerkrankungen und Krebs

Max-Planck-Forscher haben den biochemischen Befehl identifiziert, der das Wachstum von Blutgefäßen startet: ein Protein namens Jagged 1. Gleichzeitig haben sie aufgeklärt, wie die verschiedenen Akteure der Blutgefäßbildung zusammenspielen. Jagged 1 ist Biologen schon länger bekannt und übernimmt Funktionen in verschiedenen Organen. Es bindet an den Notch-Rezeptor, der auf Blutgefäßzellen sitzt und wie ein Schalter für das Wachstum neuer Adern wirkt. Wie Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für molekulare Biomedizin in Münster herausgefunden haben, stellt Jagged 1 den Schalter auf „Ein“: Die Zelle ist dann empfänglich für den Wachstumsfaktor VEGF und teilt sich – ein neues Gefäß entsteht. Als Gegenspieler von Jagged 1 tritt Delta-

like 4, kurz Dll4, auf. Dieses Protein legt den Schalter auf „Aus“ um. Dass der Mechanismus nun genau bekannt ist, könnte helfen, Therapien für verschiedene Krankheiten zu entwickeln. Denn Blutgefäße gezielt wachsen zu lassen, würde Schäden durch einen Herzinfarkt oder Schlaganfall abwenden oder reparieren. Möglicherweise lassen sich auf diese Weise auch transplantierte Organe schneller an den Blutkreislauf anschließen. Auf der anderen Seite lässt sich das Tumorwachstum bremsen, wenn Ärzte die Bildung neuer Blutgefäße in der Geschwulst unterdrücken. (CELL, 12. Juni 2009)

Lebensadern: Das Wachstum neuer Blutgefäße wird über einen Regelkreis aus fördernden und hemmenden Faktoren gesteuert.



Der Thymus am Ort seiner Entstehung – das Organ (blau) trat erstmals vor 500 Millionen Jahren beim Hai auf. Hier sitzt er am Schlund, beim Menschen oberhalb des Herzens: Bis zur Geschlechtsreife wächst hier eine Gruppe weißer Blutkörperchen und wird dabei ausdifferenziert.

reifen Lymphozyten eine Zeit lang im Thymus verweilen. Tatsächlich stellten die Freiburger Forscher fest, dass bei den Haien Gene für Signalproteine hinzukamen, die undifferenzierte Lymphozyten in das Organ locken, wo sie ihr Spezialtraining erhalten. Die Wissenschaftler hoffen, dass ihre Erkenntnisse über die Evolution des Thymus auf lange Sicht Patienten mit Immunerkrankungen zugute kommen. Sie könnten nämlich Hinweise geben, welche entscheidenden Fehler deren Immunsystem schwächen. Fehler, die sich möglicherweise korrigieren lassen. (CELL, 25. Juni 2009)

Eine Störung, mit der zu rechnen ist

Schwäche in Stärke verwandeln können nur Therapeuten – und Physiker. Ein internationales Forscherteam unter anderem vom Max-Planck-Institut für Quantenoptik hat einen Vorschlag gemacht, wie sich Störungen für Quantenrechnungen nutzen lassen könnten. Bislang galt unter Physikern als ausgemacht: Ein Quantencomputer lässt sich nur bauen, wenn man seine zentralen Recheneinheiten, die Quantenbits, von Störungen abschirmen kann. Denn Quantenbits sind sehr empfindlich gegen Störungen. Doch diese lassen sich nur schwer vermeiden, weil jeder Kontakt zur Umwelt wie eine Störung wirkt. Also haben die Forscher eine Rechenvorschrift ausgeklügelt, in der sie gerade den Kontakt zur Umwelt für Rechenoperationen nutzen. Das funktioniert aber nur unter einer Bedingung: Die Physiker müssen genau wissen, was eine Fremdeinwirkung mit den Quantenbits macht. Die Störung könnte die Quantenbits in einen Zustand bringen, der das Rechenergebnis enthält. Mit ihrem Vorschlag wollen die Forscher ihren Kollegen vor allem verdeutlichen, dass es sich lohnt zu fragen, ob sich ein Nachteil zum Vorteil wenden lässt.

(NATURE PHYSICS, September 2009)

Brücken, die Sand verbinden

Eine Sandburg ist ein komplexes Gebilde, zumindest in ihrem Inneren. Denn hier bilden Sandkörner, Wasser und Luft eine filigrane Struktur. Was diese zusammenhält, erforschen **Stephan Herminghaus** und seine Mitarbeiter am Göttinger **Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation** und gewinnen dabei auch Erkenntnisse für Industrieprozesse, die Vorhersage von Erdbeben und die Erdölförderung.

TEXT **CHRISTIAN MEIER**

Was Sandburgen mit Ölfeldern zu tun haben, ist auf den ersten Blick nicht zu erkennen. Tatsache aber ist: Nachdem der Physiker Stephan Herminghaus mit seinem Team am Göttinger Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation ein lange ungeklärt gebliebenes Rätsel um die erstaunliche Stabilität von Sandburgen gelöst hatte, bekam er einen Anruf vom Ölkonzern BP.

Aber der Reihe nach: Am Anfang der Geschichte stand pure wissenschaftliche Neugier. Herminghaus faszinierte ein alltägliches Wunder am Badestrand: die eindrucksvolle Allianz von Sand und Wasser. Eine Flüssigkeit macht aus einem gestaltlosen Rieselgut, das durch den engen Hals einer Sanduhr fließt und sich von Windböen widerstandslos zerstäuben lässt, ein festes und formbares Baumaterial für Sandburgen und filigrane Skulpturen. Rätselhaft fanden Stephan Herminghaus und seine Mitarbeiter vor allem folgendes Phänomen: Die Festigkeit des nassen Sandes ist weitgehend unabhängig von der beigemischten Was-

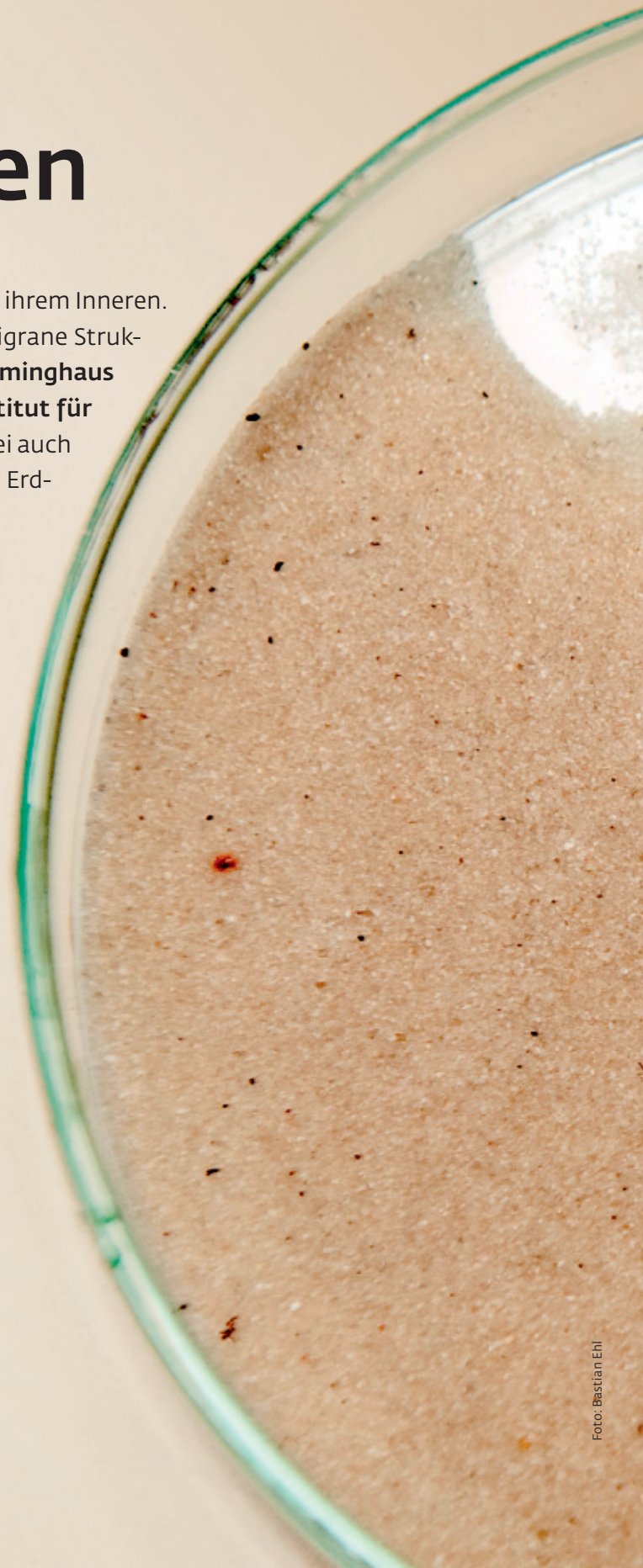
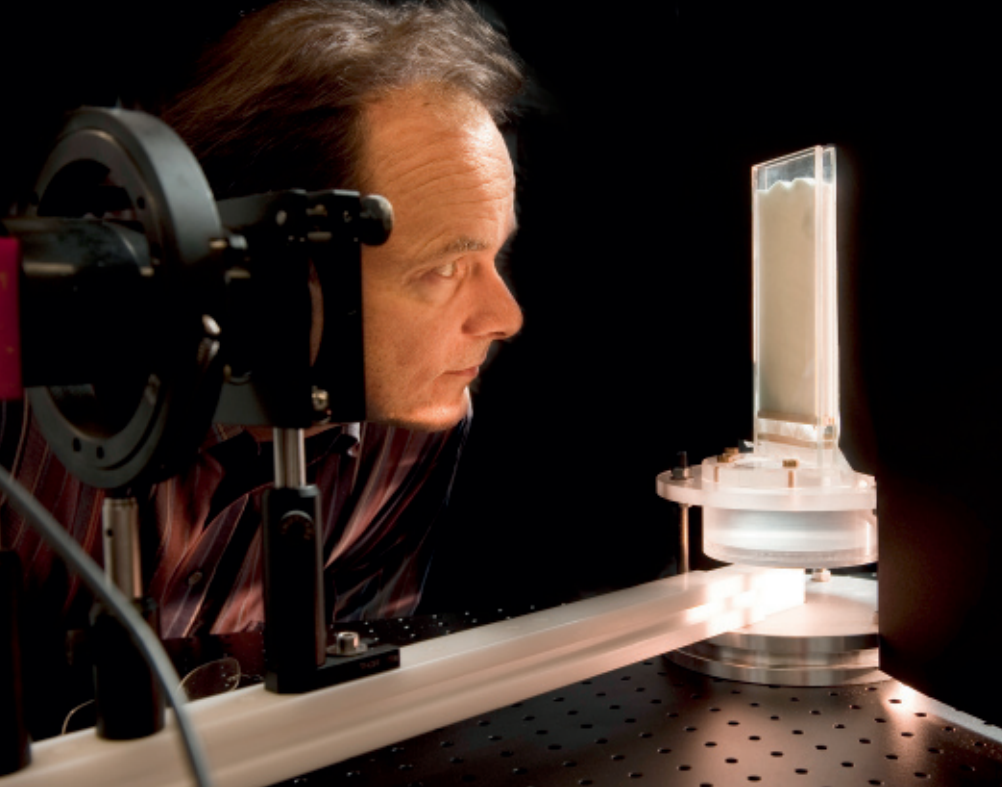


Foto: Bastian Ehl



Auf die Mischung kommt es an: Nur wenn Wasser und Sand in der richtigen Menge zusammenkommen, haften die Sandkörner aneinander. Hier breitet sich aufgetropftes Wasser in einer Schale mit Sand aus und befeuchtet diesen.



Lichtstreuung in Granulat: Stephan Herminghaus kontrolliert eine Küvette, die mit winzigen Glaskügelchen gefüllt ist. In diesem Experiment untersucht der Forscher am Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation die Diffusion von Licht durch Granulat.

sermenge. Ein fast noch trockener Sand ist ebenso formbar und stabil wie Sand, der schon fast völlig mit Wasser durchtränkt ist. Deshalb braucht kein Sandburgenbauer ein Rezept für sein Baumaterial.

Um diesem Phänomen systematisch auf den Grund zu gehen, untersuchten die Göttinger Forscher eine Art Modellsand: Glaskügelchen mit Durchmessern zwischen 0,2 und 0,3 Millimetern. Wie die meisten Sandkörner bestehen auch die Glaskügelchen aus Siliziumdioxid. Der Modellsand unterscheidet sich vom Sand am Strand nur darin, dass seine Körner perfekte Kugeln formen. Das Glaskugel-Granulat befeuchteten die Physiker unterschiedlich stark und maßen die mechanischen Eigenschaften der so entstandenen Paste, wie etwa deren Reißfestigkeit.

Dazu füllten sie den nassen Modellsand in ein zylindrisches Gefäß, das sie auf eine rotierende Platte setzten. Dann erhöhten die Forscher langsam die Drehgeschwindigkeit, bis das Granulat auseinanderriß. Aus der Drehgeschwindigkeit berechneten sie die Reißfestigkeit. Außerdem bestimmten sie den Widerstand, den das Granulat Scherkräften entgesetzt. Diese Kräf-

te wirken etwa, wenn ein Spielverderber eine Sandburg attackiert, indem er parallel zum Boden gegen die Festung drückt. Schließlich ermittelten die Göttinger Forscher auch die Beschleunigung, der man den nassen Modellsand aussetzen muss, um ihn zum Fließen zu bringen.

FESTES GRANULAT VERWANDELT SICH IN FAST FLÜSSIGEN MATSCH

Das Ergebnis: Alle drei Größen hängen in gleicher Weise vom Wassergehalt ab. Bereits bei geringsten Wasserzugaben steigen sie schlagartig an: Das ist der Übergang vom Wüstensand zur Paste. Sie bleiben weitgehend konstant, wenn man den Wasseranteil weiter erhöht. Erst bei etwa 20 Volumenprozent Wasser nehmen die drei Größen wieder deutlich ab: Aus dem festen Granulat wird ein fast flüssiger Matsch. Das Granulat zeigt somit ein ähnliches Verhalten wie natürlicher Sand.

Es eignete sich also tatsächlich als Modell, und zwar nicht nur für Sand, sondern auch für das, was bei so manchem Erdbeben passiert: Wird das Material zu feucht, verliert es seine Steifigkeit. Warum das mitunter sehr plötzlich geschieht und je nach der

genauen Zusammensetzung des Bodens bei ganz unterschiedlichem Wassergehalt, ist ein komplexes Problem. Da wartet noch viel Arbeit auf die Wissenschaftler, die sich mit solchen Fragen beschäftigen. Die Göttinger Max-Planck-Forscher widmeten sich zunächst der Frage, warum die Sandpaste bei geringerem Wassergehalt überhaupt so fest zusammenhält.

Das zu untersuchen ist schon schwierig genug. Denn um ihre Beobachtungen zu verstehen, mussten sie in das Granulat hineinschauen. „Wir wollten wissen, wie sich das Wasser in den vielen engen Hohlräumen zwischen den Kügelchen verteilt“, sagt Herminghaus. Ein Lichtmikroskop half ihnen nicht weiter, weil die vielen Kügelchen das Licht in alle Richtungen brechen.

Die Lösung bot die Röntgentomografie. Dabei wird das nasse Granulat, ähnlich wie bei einem Computertomografen im Krankenhaus, von allen Seiten mit einem Röntgenstrahl durchleuchtet. Da Wasser, Glaskugeln und Luft die Röntgenstrahlung unterschiedlich stark absorbieren, entsteht bei jeder Aufnahme ein scharf umrissenes Schattenbild. Aus der Kombination der Bilder berechnet ein Computer



Die Naturkatastrophe von Nachterstedt in Sachsen-Anhalt zeigt, wie wichtig die Forschung an nassen Sanden ist: Im Juli 2009 rutschte dort ein Uferstück eines Tagebausees ab und riss zwei Häuser mit drei Bewohnern in die Tiefe.

die räumliche Struktur der Probe, und zeigt auch, wie sich das Wasser im Raum verteilt. Je ein solches dreidimensionales Bild nahm das Team von Herminghaus am Elektronensynchrotron in Grenoble für unterschiedliche Wassermengen auf.

„Als wir die Bilder betrachteten, staunten wir“, berichtet Herminghaus. Mit zunehmender Wassermenge habe sich die räumliche Struktur der Wasserverteilung zwischen den Sandkörnern mehrmals grundsätzlich verändert, berichtet der Forscher. „Wir fragten uns: Wie kann es sein, dass die mechanischen Eigenschaften davon nichts merken?“

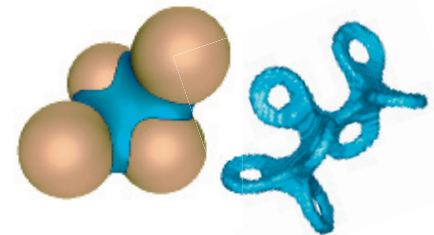
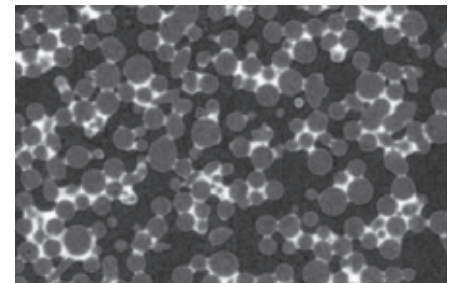
KAPILLARBRÜCKEN BILDEN EINEN RING UM DIE KONTAKTSTELLE

Folgendes spielt sich im Granulat ab: Bereits bei sehr geringen Wasserzugaben bilden sich sofort Wasserbrücken zwischen jeweils zwei Körnern. Das Wasser versucht, möglichst viel Glas zu bedecken, weil die Wassermoleküle von der Glaswand angezogen werden. Deshalb wandert das Wasser dorthin, wo es zwei Kugeln gleichzeitig berührt: zu den Kontaktpunkten zwischen zwei Kügelchen. Die so entstehende flüssige

Verbindung zwischen zwei Kugeln nennen Physiker eine Kapillarbrücke. Sie bildet einen Ring um die Kontaktstelle herum.

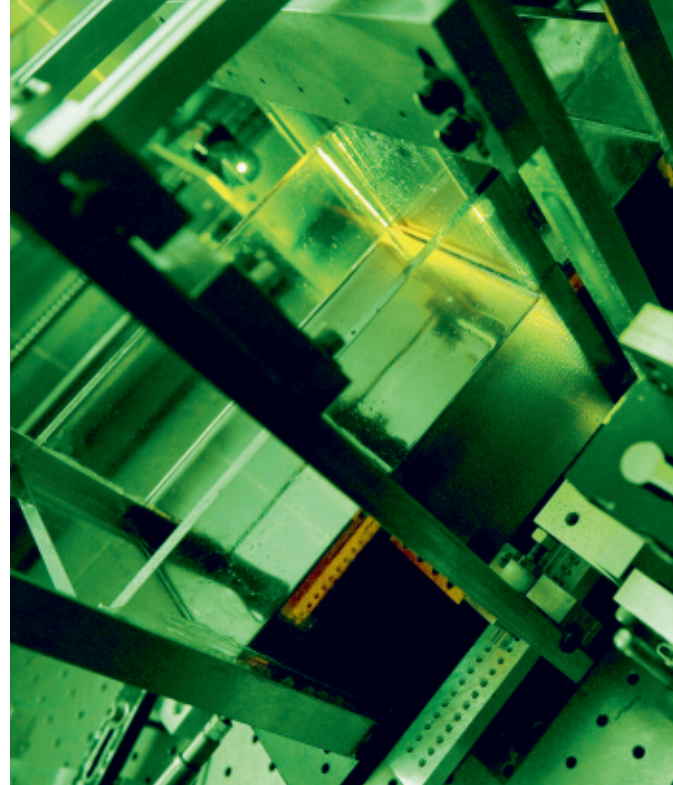
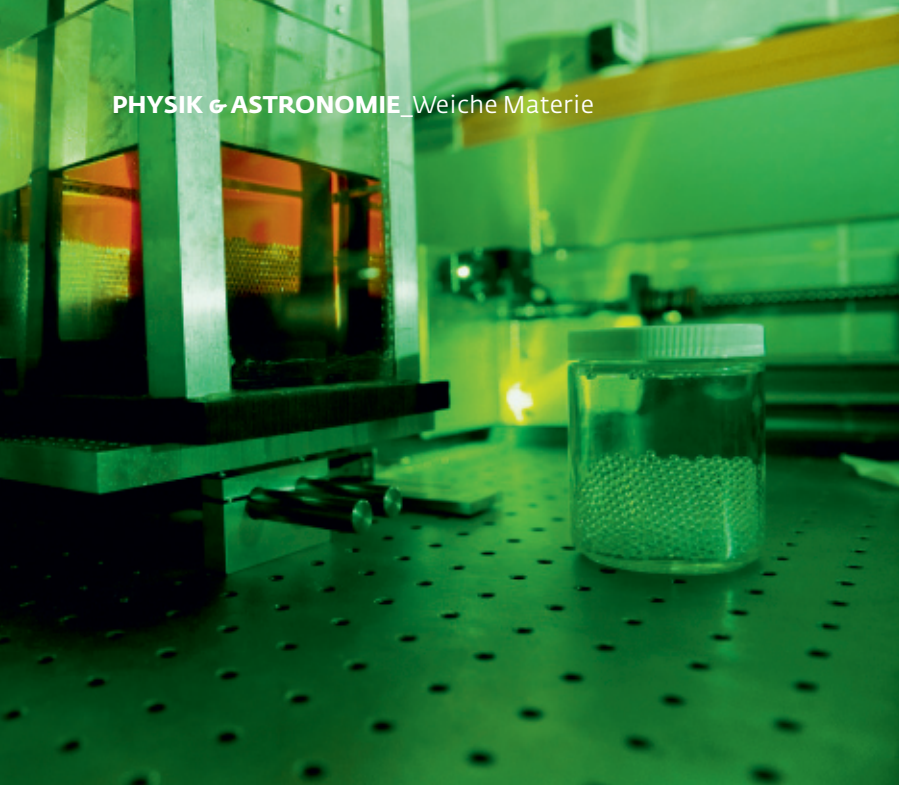
Ab etwa drei Prozent Wassergehalt fangen diese Kapillarbrücken an miteinander zu verschmelzen, sodass einzelne Wassernester entstehen. Gibt man noch mehr Wasser hinzu, verbinden sich die kleinen Nester zu größeren Nestern. Bei rund zehn Prozent Wassergehalt werden diese so groß, dass sich in der Probe Wasserstraßen bilden, die von ihrem einen Ende zum andern reichen. „Ein Pantoffeltierchen könnte nun durch die Probe hindurchschwimmen, ohne an die Luft zu müssen“, sagt Herminghaus.

„Dass diese komplexen Umwandlungen keine Änderung der mechanischen Stabilität mit sich bringen, konnten wir intuitiv nicht verstehen“, konstatiert der Physiker. Nur das Geschehen bei wenig Wasserzugabe, solange sich im Granulat nur einzelne Wasserbrücken befinden, verstanden die Forscher leicht. Die Grenzfläche zwischen der Kapillarbrücke und der Luft wölbt sich konkav, also in das Wasser hinein. Dadurch entsteht ein Unterdruck im Wasser, der die Kügelchen aneinandersaugt. >



oben | Schnittbild durch ein feuchtes Granulat. Die Aufnahme wurde mithilfe der Röntgentomografie gewonnen; die Körner erscheinen grau, das Wasser weiß und die Luft schwarz.

unten | Die Computersimulation links zeigt Flüssigkeitsnester (blau) und Granulatkugeln (gelb), das rechte Teilbild die tomografische Abbildung einzelner Flüssigkeitsnester.



Komplexer Versuchsaufbau: Doktorand Frank Rietz beobachtet, wie sich die Packung von Kugeln in einer Scherkammer verdichtet – einer Art oben offenem Aquarium, in dem die Glaswände periodisch hin und her kippen und die Glaskugeln zwischen den Platten dadurch „verschert“ werden.

Kommt nun mehr Wasser ins Granulat, strömt dieses in die Kapillarbrücke, sodass sie wächst. Die konkave Wölbung der Wasseroberfläche nimmt daher ab und mit ihr der Unterdruck. Die Abnahme der Saugwirkung wird aber durch die Zunahme der Kontaktfläche mit den Glaskugeln, auf die sie wirkt, gerade ausgeglichen. Deshalb bleibt die durch die Kapillarbrücken ausgeübte Anziehungskraft zwischen den Kügelchen konstant und mit ihr die Festigkeit des Granulats.

„Spannend wird es aber, wenn zwei wachsende Kapillarbrücken sich verbinden“, sagt Herminghaus. Dies geschieht immer dann, wenn sich zwei benachbarte Kapillarbrücken berühren. Dann verschmelzen sie und füllen den gesamten Hohlraum zwischen jeweils drei Kugeln mit Wasser. Weil die drei Kugeln meist in Kontakt miteinander stehen, gibt es eine dritte Kapillarbrücke, die zwangsläufig mitverschmilzt: ein Kapillarbrücken-„Trio“ entsteht. Weil die beteiligten Kugeln etwa gleich groß sind, bildet sich das Trio immer dann, wenn die Kapillarbrücken eine ganz bestimmte Größe erreicht haben, also auch immer beim gleichen Unterdruck, dem sogenannten Verschmelzungsdruck.

Ähnliches geschieht, wenn das Kapillarbrücken-Trio sich mit weiteren Brücken oder anderen Trios zu größeren Nestern vereint. „All dies lässt sich mit der Tomografie sehr schön verfolgen und bestätigen“, sagt Herminghaus. Somit hatten die Forscher verstanden, was bei der Wasserzugabe über drei Prozent Wassergehalt hinaus passiert: Es entstehen keine neuen Brücken mehr, sondern die vorhandenen wachsen zu Nestern zusammen.

DER DRUCK WIRKT VON ALLEN SEITEN

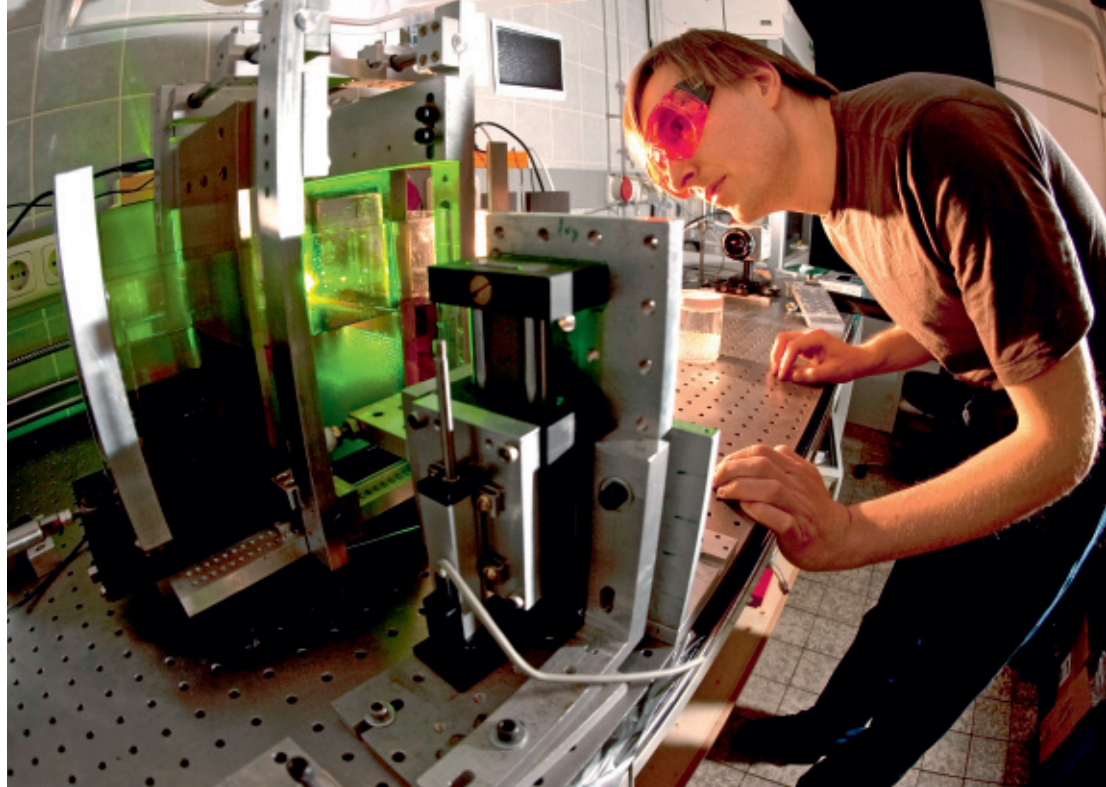
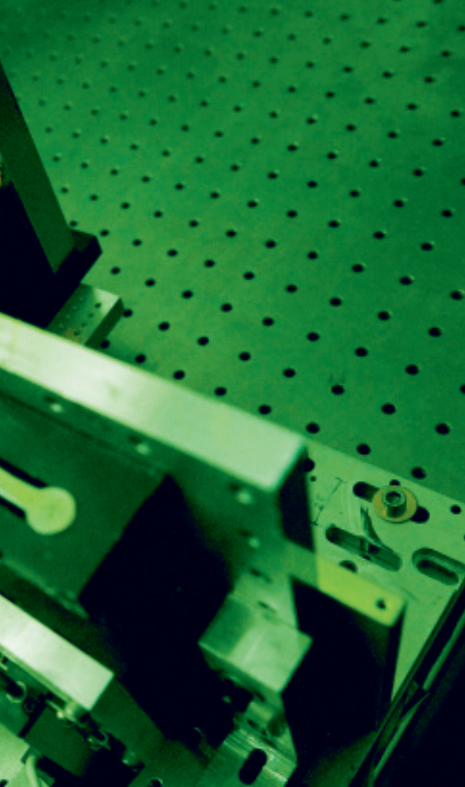
Doch es blieb ein Rätsel übrig: Warum wirkt sich der Unterdruck auch dann noch unverändert auf die Stabilität des Materials aus, wenn bereits ein großer Teil der Körner von Wasser umgeben zu sein scheint? Auf diese gleichsam im Wasser schwimmenden Körner wirkt der Druck dann von allen Seiten und sollte sich völlig ausgleichen. Unterm Strich bliebe keine Saugwirkung übrig, welche das Granulat zusammenhalten könnte.

Auch hier lieferten die Röntgentomogramme den entscheidenden Hinweis. Sie zeigten nämlich, dass es auch dann noch viele luftgefüllte Hohlräume

gibt. „Das Granulat ist nicht von einem ‚See‘, sondern von einer filigranen Wasserskulptur durchdrungen“, erklärt Herminghaus. Alle Körner stehen mit Wasseroberfläche in Kontakt und werden von deren Oberflächenspannung mechanisch stabilisiert.

Nun ist ein Becher voller Glaskugeln kein natürlicher Sand, denn dessen Körner formen alles andere als perfekte Kugeln. Dennoch sind sich die Göttinger Physiker sicher, dass ihr Erklärungsmodell auch für Sand gilt. Sie haben nämlich nicht nur festgestellt, dass die mechanischen Eigenschaften in natürlichem feuchten Sand beinahe in gleicher Weise von der Flüssigkeitsmenge abhängen wie im Modellsand. Wie das Röntgentomogramm zeigte, bildeten ihre Wassernester auch eine sehr ähnliche Struktur.

Auch die Hersteller von Tabletten kennen seit Langem das Phänomen, dass sich die mechanischen Eigenschaften von feuchten Granulaten nicht ändern – auch wenn ihr Flüssigkeitsgehalt variiert. Die Pharmaproduzenten verwenden Rührmaschinen, die Trägerpulver und Wirkstoff mit einer Flüssigkeit vermengen, um daraus die Pillen zu formen. „In einem weiten Feuchtigkeitsbereich verbrauchen die Mixer im-



mer etwa gleich viel Leistung“, berichtet Herminghaus. Der Widerstand, den das Gemisch den Rührern entgegensetzt, ändert sich also nicht wesentlich, wenn es nasser wird.

Herminghaus betont, dass seine Forschungsergebnisse nicht nur für Sandbildhauer und Pillenhersteller wichtig sind. „Sie können vermutlich auf die meisten in der Natur vorkommenden Sande und eine große Zahl weiterer Sedimente angewendet werden“, sagt der Physiker. Die meisten natürlichen Sedimente sind nämlich durch den langen Transport in Wasser und Wind recht gut „sortiert“, wie es im Geologenjargon heißt. Im Klartext: Alle Körnchen sind etwa gleich groß. So bestimmt etwa die Fließgeschwindigkeit eines Flusses die Größe der Körner, die sich in seinem Bett ablagern. „Deshalb könnten unsere Ergebnisse helfen, Erdbeben besser zu verstehen und vielleicht sogar einmal rechtzeitig vorherzusagen“, sagt Herminghaus.

Die Forschung von Herminghaus lässt sich auch noch in einen weiteren Kontext einordnen, der Physiker in aller Welt brennend interessiert. Nämlich die Frage, ob es übergeordnete, universell geltende Gesetzmäßigkeiten für Komplexität und Selbstorganisati-

on gibt. Oder anders gefragt: Werden völlig unterschiedliche Systeme wie feuchte Granulate, Ameisenkolonien oder das menschliche Gehirn von den gleichen Komplexitäts-Regeln regiert? Solche Regeln, so die Hoffnung vieler Physiker, würden es einfacher machen, die Physik hochkomplizierter Phänomene zu verstehen.

AUF RICHTIGE FRAGEN GIBT ES EINFACHE ANTWORTEN

In dieser Frage ist die Physikerwelt gespalten. „Ich habe mich viel damit beschäftigt und bin zu der Meinung gelangt, dass es solche universellen Gesetze nicht gibt“, sagt Herminghaus. Er hält die Suche nach allgemeingültigen Formeln hier eher für behindernd. „Jedes komplexe System ist ein Fall für sich, dem man sich als Wissenschaftler ganz neu stellen muss“, sagt er.

Dennoch hat er eine Art Methodik entwickelt, sich komplexen Systemen zu nähern. Er geht ähnlich vor wie ein Kriminalist: „Ich versetze mich gewissermaßen in das System hinein und stelle mir bildlich vor, wie es funktioniert“, erläutert der Physiker. Zur Methode gehört auch, wenn man so will, eine intelligente Verhörtechnik:

„Wenn man einem komplexen System die richtigen Fragen stellt, gibt es erstaunlich einfache Antworten“, sagt Herminghaus. Es zeige einem dann oft sehr simple Regeln, nach denen es funktioniert. Die Aufgabe des Forschers sei es, die richtige Frage zu finden.

Wie überraschend einfach die Antworten sein können, zeigte die Göttinger Gruppe ebenfalls am feuchten Granulat aus Glaskugeln. Sie untersuchten, wie es auf unterschiedlich starkes Schütteln reagiert. Dafür füllten sie es in ein flaches zylindrisches Plastikgefäß und stellten dies auf einen Rüttler. Dann änderten sie die Energie und die Beschleunigung des Rüttelvorganges, indem sie entweder die Amplitude oder die Frequenz des Rüttlers variierten.

Das feuchte Granulat zeigte dabei ein sehr komplexes Verhalten. Es durchlief ähnliche Phasenübergänge wie ein Festkörper, der beim Erhitzen schmilzt und dessen Teilchen sich schließlich zu einem Gas verflüchtigen. In ähnlicher Weise lagen die Körnchen bei geringer Beschleunigung dicht aneinandergepackt und blieben unbeweglich, was dem festen Zustand entspricht. Erhöhte sich die Beschleunigung, gingen sie in eine



Unterschiedliche Korngröße, unterschiedliche Eigenschaften – und eine reiche Auswahl: Für einen Versuch holt sich Doktorand Mirko Lukovic im Labor das passende Material. Das steht, ordentlich in Fläschchen abgefüllt, in Form von allen möglichen Sorten Sand, Granulat und Glaskugeln bereit.

Art flüssige Phase über, in der sich die Teilchen schneller bewegten und durch das Granulat wanderten.

Richtig interessant wurde es, als die Forscher bei hoher Beschleunigung auch die Energiezufuhr erhöhten. Dann zeigte sich eine dritte, gasförmige Phase, in der sich die Körnchen sehr schnell und frei bewegten. Diese Gasphase existierte in der Mitte der Plastikschaale. Darum herum blieb ein Ring der flüssigen Phase erhalten, in dem die Teilchen sich wesentlich langsamer bewegten. Weil die mittlere Teilchengeschwindigkeit ein Maß für die Temperatur ist, besaß diese Doppelpphase also zwei Temperaturen. Wahrlich ein komplexes Geschehen, wie man es beim Kochen von Wasser auf dem Herd kaum erleben dürfte.

DER COMPUTER BRINGT LICHT IN KOMPLEXE SYSTEME

Die Vermutung liegt nahe, dass ein solches Verhalten von sehr vielen unterschiedlichen Eigenschaften und Details des feuchten Granulats abhängt. In Computersimulationen haben die Göttinger Physiker aber gezeigt, dass dem nicht so ist. „Wir fragten uns, wie die Phasenübergänge von dem Verlauf

der Kraft abhängen, mit der eine Kapillarbrücke an den Kügelchen zieht, wenn sie sich voneinander entfernen“, erläutert Herminghaus. Die Brücke gleicht einer Feder, die umso stärker zieht, je mehr Abstand die Glaskugeln voneinander haben, und die bei einer bestimmten Zugkraft reißt.

Dieses Verhalten simulierten die Forscher im Computer und erhielten ein Phasendiagramm, das dem beobachteten gut entsprach. Dann machten sie eine gewagte Annahme: Das Verhalten des Systems hänge gar nicht davon ab, wie sich die Zugkraft der Kapillarbrücke mit dem Abstand der Kugeln verändert, sondern nur von der Energie, die man hineinstecken muss, um die Brücke zu zerreißen.

Und tatsächlich: Als sie die Simulation unter dieser Annahme wiederholten, erhielten die Forscher das gleiche Phasendiagramm wie bei der Simulation zuvor. Sie hatten mit der Energie, die zum Brechen der Kapillarbrücke nötig ist, die wesentliche Stellschraube gefunden, die das Verhalten des gerüttelten feuchten Granulats beschreibt.

Für Stephan Herminghaus zeigt dieses Beispiel, worin ein Schlüssel zum Verständnis komplexer Systeme liegt: die wesentlichen Eigenschaften

des Systems zu identifizieren und die vielen irrelevanten Details auszublenden. „An seinen wesentlichen Stellen ist jedes System einfach“, sagt Herminghaus. „Die Kunst, diese ‚wesentliche Stelle‘ zu finden, lässt sich nicht im Studium erlernen, sie kann nur ein Ergebnis langjähriger Erfahrung sein.“

NEUE ERKENNTNISSE SOLLEN DIE FÖRDERUNG EFFIZIENTER MACHEN

„Ich glaube, dass es diese Fähigkeit ist, die BP überzeugt hat, unsere Forschung zu fördern“, sagt der Physiker. Der Ölkonzern hat nämlich ein Problem: In den Ölfeldern bleiben Reste, die sich nicht oder nur schwer ausbeuten lassen. Wenn das Öl nicht mehr von selbst an die Oberfläche sprudelt, helfen die Ölförderer nach, indem sie Wasser ins poröse Gestein pumpen, welches das Öl herausdrücken soll. Dabei bilden sich im Untergrundgestein Ölnester, die nicht mehr zu den Förderrohren gelangen: Das Öl bleibt in der Tiefe.

„Diese Nester haben eine ganz ähnliche Struktur wie die Wassernester in einem Granulat und sollten ähnlichen Gesetzmäßigkeiten folgen“, sagt Herminghaus. Noch komplexer wird es, wenn man einmal Kohlendioxid in



leeren Ölfeldern speichern will. Dann muss man nicht zwei, sondern drei Komponenten, nämlich Kohlendioxid, Wasser und restliches Rohöl zwischen die Körner quetschen. „Hier gibt es noch enormen Forschungsbedarf“, sagt Herminghaus.

BP UNTERSTÜTZT DIE FORSCHUNG FINANZIELL

„Die nachhaltige Energieversorgung der Welt ist ein vielschichtiges Problem“, sagt Herminghaus. „Die Aufgabe von uns Wissenschaftlern ist es, das Wissen zu liefern, auf dessen Basis die richtigen Entscheidungen getroffen werden können.“ Nun fördert BP die Forschung seiner Abteilung zehn Jahre lang mit jährlich einer Million US-Dollar. Die Göttinger haben mit dem Ölkonzern aber vereinbart, dass sie ihr Forschungsprogramm weiterhin selbst bestimmen. „Wir wollten uns keine Forschungsagenda aufoktroyieren lassen“, sagt der Physiker. „Es ist schön und ermutigend, dass auch große Industrieunternehmen wie BP dies akzeptieren.“

Und so geht die Forschung am Göttinger Max-Planck-Institut weiter wie geplant. Als Nächstes will Herming-

haus neue Arten von Modellsand untersuchen. Sie bestehen aus winzigen Platonischen Körpern wie etwa Tetraedern und Oktaedern. „Ziel ist es, den Einfluss der Körnchenform auf die Stabilität des nassen Granulates zu verstehen“, sagt der Physiker. Damit nähern er und seine Mitarbeiter sich einem genaueren Verständnis, wie Feuchtigkeit natürliche Sande zusammenhält, deren Partikel unterschiedlich geformt sind. Und daraus lernen sie vielleicht auch mehr darüber, wie sich Öl in den unregelmäßig geformten Poren von Felsen verhält. ◀

GLOSSAR

Siliziumdioxid

Sammelbegriff für chemische Verbindungen mit der Summenformel SiO_2 ; fasst Modifikationen der Oxide des Siliziums zusammen. Es gibt kristallines und amorphes SiO_2 , die bekannteste kristalline Form ist Quarz.

Röntgentomografie

Bildgebendes Verfahren zur Darstellung einer Schicht innerhalb des zu untersuchenden Objekts. Während der Belichtung werden der Röntgenfilm und die Strahlenquelle gegenläufig bewegt. Dadurch entsteht ein scharfes Bild der Strukturen in der Fokusebene, während alles andere verwischt wird.

Kapillarbrücke

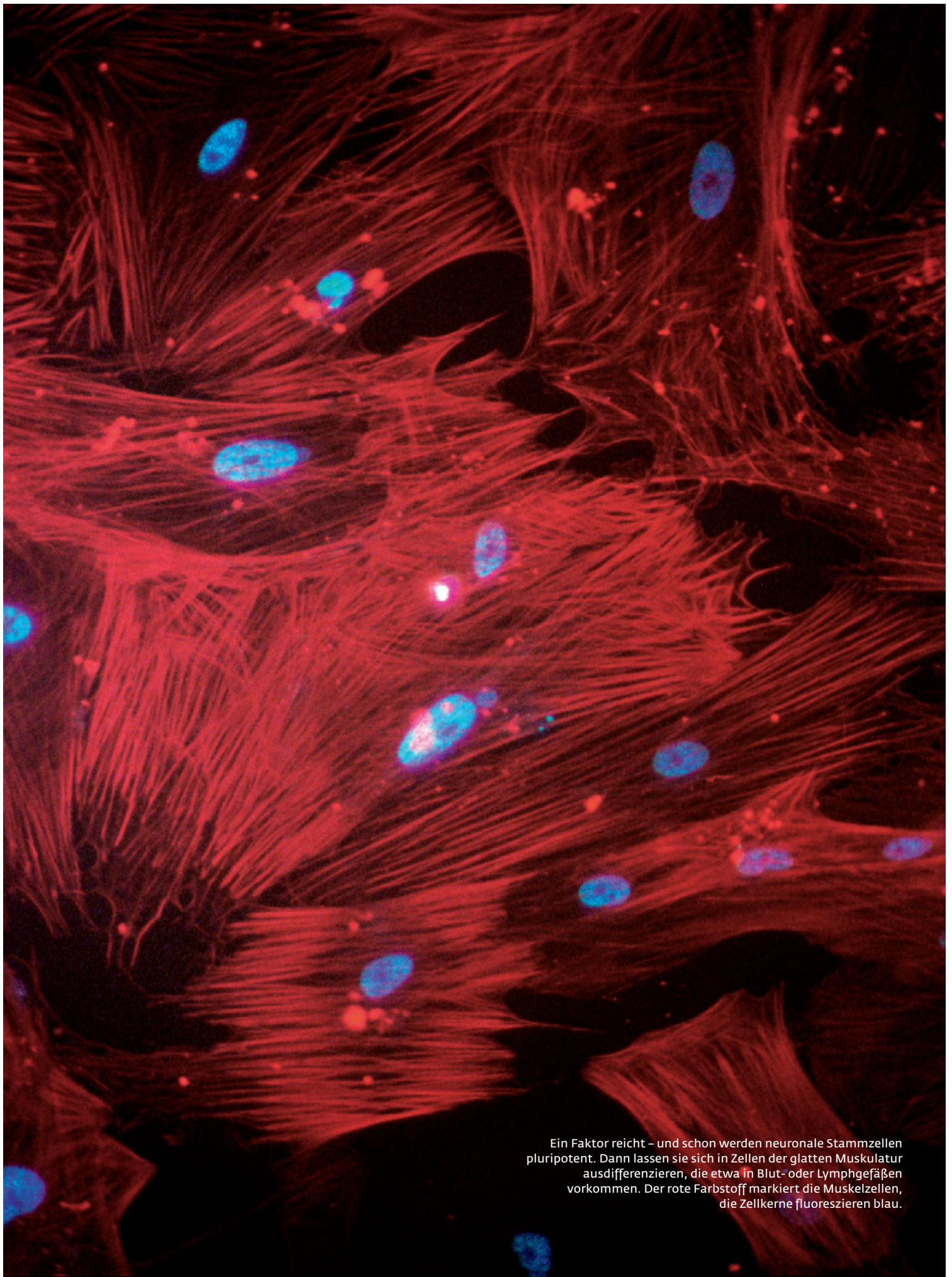
Flüssige Verbindung, die über die Kraft der Oberflächenspannung eine Wechselwirkung zwischen den Körnern erzeugt.

Platonische Körper

Vollkommen regelmäßige Körper aus gleichgroßen, gleichseitigen und gleichwinkligen Vielecken. In jeder Ecke eines solchen Körpers stoßen genau gleich viele Flächen aneinander.

Phasendiagramm

Schematische Darstellung von Phasen und ihren Phasengrenzen in Abhängigkeit von Temperatur, Druck und Zusammensetzung. Solche Diagramme können Stoffe mit ihren festen, flüssigen und gasförmigen Aggregatzuständen beschreiben.



Ein Faktor reicht - und schon werden neuronale Stammzellen pluripotent. Dann lassen sie sich in Zellen der glatten Muskulatur ausdifferenzieren, die etwa in Blut- oder Lymphgefäßen vorkommen. Der rote Farbstoff markiert die Muskelzellen, die Zellkerne fluoreszieren blau.

Potenzmittel für Zellen

Keine spezialisierte Zelle, so lautete ein Dogma der Biologie, könne etwas anderes werden, als sie ist. Doch inzwischen ist es Forschern um **Hans Schöler** am **Max-Planck-Institut für molekulare Biomedizin** in Münster gelungen, mit einem einzigen Faktor aus adulten Stammzellen des Gehirns jene Alleskönner zu züchten, auf denen die Hoffnungen der regenerativen Medizin ruhen.

TEXT **KLAUS WILHELM**

Die Revolution im Reagenzglas scheint nicht gerade spektakulär – rein optisch durchs Mikroskop betrachtet. Doch im Inneren der als kleine Punkte erkennbaren Zellen hat sich in den vergangenen Tagen im Labor des Max-Planck-Instituts für molekulare Biomedizin Außergewöhnliches ereignet. Noch vor zwei Wochen waren es Hautzellen eines Menschen mit Parkinson – ausdifferenzierte Körperzellen, die den krank machenden Gen-Defekt tragen und die Ärzte der Technischen Universität Dresden dem Patienten entnommen hatten. Dann wurden sie zu den Wissenschaftlern um Hans Schöler nach Münster gebracht. Diese boten den Zellen eine Mischung von Nährstoffen und Wachstumsfaktoren – und infizierten sie zudem mit Viruspartikeln, die mit vier Genen beladen waren, welche die kryptischen Kürzel Oct4, Sox2, c-Myc und Klf4 tragen.

Vier Gene, die aus einigen der Hautzellen in etwa einem Monat „humane induzierte pluripotente Stammzellen“ gemacht haben – sozusagen embryonale Stammzellen ohne Embryonen. Jene Zellen, aus denen sich alle etwa 200 Zelltypen des menschlichen Organismus erzeugen lassen – Zellen der Haut, der Knochen, der Nieren, des Magens. Mehr noch: Zellen, mit denen man, so die Hoffnung, auch die Entstehung

der Parkinson-Krankheit nachzeichnen kann, um einfacher und effektiver als bisher Medikamente dagegen zu entwickeln. In diesem neuesten Zweig der Forschung mit den induzierten pluripotenten Stammzellen, kurz iPS-Zellen oder im Laborjargon lapidar „Ipse“ genannt, „zählen wir sicher zu den weltweit führenden Forschungsgruppen“, sagt Hans Schöler. Nur wenigen Teams ist die Reprogrammierung „erkrankter“ menschlicher Zellen bislang gelungen; in diesen Fällen, bei zwei seltenen Hirn- und Muskelerkrankungen, glückte bereits die Differenzierung zu krankheitsspezifischen Nervenzellen.

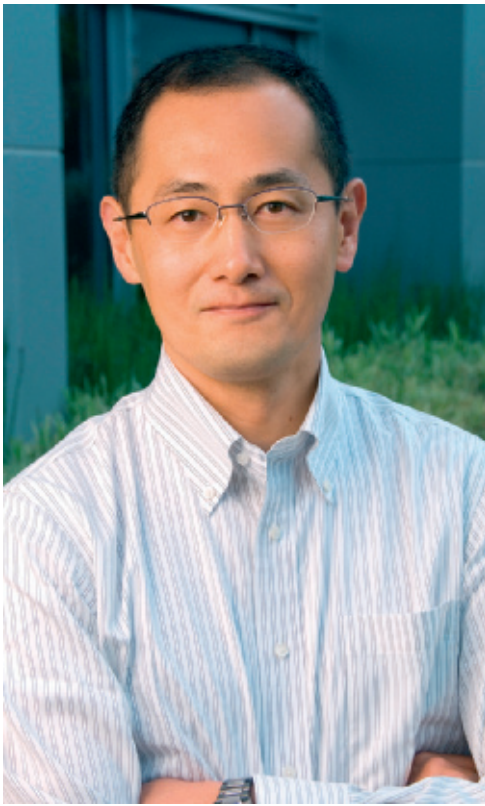
FRISCHE ZELLEN FÜR KRANKES GEWEBE

Bislang schwebt Visionären vor, Patienten mit Herzinfarkt, Diabetes, Parkinson oder vielen anderen Erkrankungen Zellen zu entnehmen, sie zu iPS-Zellen umzuprogrammieren, die iPS-Zellen wiederum in die gewünschten Zelltypen umzuwandeln und das kranke oder verletzte Gewebe durch die frischen und vitalen Zellen zu ersetzen. Das wäre die ideale Lösung, die rein technisch gesehen zumindest langfristig nicht mehr utopisch erscheint und zudem ein Kernproblem der regenerativen Medizin beheben würde: Die Zellen stammen vom Patienten selbst und werden nicht vom

Immunsystem des Empfängers abgestoßen. Der Haken: Eine derart individuelle Form der regenerativen Medizin wäre aus heutiger Sicht mit immensem Aufwand verbunden – und nur mit Automatisierung vorstellbar.

Noch 2005 hätte Hans Schöler keinen Cent darauf verwettet, dass es bereits ein Jahr später gelingen würde, das Unmögliche möglich zu machen: die Hautzelle einer Maus nur durch gentechnische Manipulationen in eine pluripotente Stammzelle zu verwandeln. Und damit die biologische Uhr quasi zurückzudrehen. Keine spezialisierte Zelle, so lautete ein Dogma aus 100 Jahren moderner Biologie, könne je wieder etwas anderes werden, als sie ist. Hat sie sich erst einmal ausdifferenziert, legt sie in ihrem genetischen Programm alle Gene still, die sie ungezügelt teilen lassen. Gleichzeitig schaltet sie jene Gene an, die eine Hautzelle zu einer Hautzelle machen.

Grundsätzlich stellen Zellen nach Anweisung der Gene Proteine und andere Moleküle her, die sie brauchen. Beim Menschen ist in jeder Zelle nur ein Teil der etwa 25000 Gene angeschaltet. Die Aktivität ihrer Gene steuern Zellen über komplizierte Signalwege, an denen etliche Proteine beteiligt sind. Vor allem braucht es sogenannte Transkriptionsfaktoren – das sind meist Proteine, die Gene an- oder ausschal-



Pioniere der Stammzellforschung: Shinya Yamanaka von der Universität Kyoto (links) gelang es erstmals, Hautzellen der Maus in Zellen zu verwandeln, die embryonalen Stammzellen sehr ähnlich sind. Hans Schöler vom Max-Planck-Institut für molekulare Biomedizin (rechts) kam mit einem Faktor (Oct4) aus, um aus Mäusehirn-Zellen diese pluripotenten Alleskönner zu züchten.

ten. Aber auch die Transkriptionsfaktoren werden von Genen kodiert und ihrerseits von einem komplexen Informationsnetzwerk gesteuert.

INITIALZÜNDUNG AUS JAPAN

Mit den Genen einiger Transkriptionsfaktoren hat Shinya Yamanaka von der Universität Kyoto im Jahre 2006 experimentiert. Wenn Hans Schöler von der Pioniertat und der Beharrlichkeit seines japanischen Kollegen erzählt, hört man aus jedem Wort Respekt – ungeachtet der immensen Konkurrenz im Feld der internationalen Stammzellforschung. „Das Programm der Körperzellen schien so festgelegt“, erzählt der Max-Planck-Wissenschaftler, „dass die meisten Forscher dachten, das kann sowieso nicht funktionieren.“ Doch der unbeirrbar Yamanaka lieferte die Initialzündung für all das, was seitdem „in atemberaubendem Tempo“ in den Stammzelllabors weltweit folgen sollte.

Der Japaner schleuste mithilfe von Viren, die als Gen-Fähren dienen, zunächst 24 Gene von Transkriptionsfaktoren in allen denkbaren Kombinationen in die Hautzellen ein. „Schon dass man ein solches Experiment mit 24 Ge-

nen erfolgreich durchführen kann, hätte ich für sehr unwahrscheinlich gehalten“, sagt Schöler.

In einer ganzen Serie von Folge-Experimenten reduzierte Yamanaka die Zahl der eingeschleusten Gene auf letztlich vier: das Quartett Oct4, Sox2, c-Myc und Klf4, das in den Hautzellen normalerweise abgeschaltet ist. Und erntete am Schluss pluripotente Stammzellen. Zwar ist das Verfahren nicht gerade effizient – nur jede tausendste bis zehntausendste Hautzelle wird reprogrammiert –, aber es funktioniert! Mit den sich unbegrenzt selbsterneuernden iPS-Zellen beginnt ein neues Kapitel in der Stammzellforschung, das immer schneller fortgeschrieben wird.

Schon 1998 hatte der US-Amerikaner James Thomson embryonale Stammzellen (ES-Zellen) des Menschen im Labor gezüchtet und damit den ersten Meilenstein gesetzt. Normalerweise wachsen pluripotente Stammzellen nur in einem sehr frühen Stadium der Embryonalentwicklung: Sie sammeln sich im Inneren der Blastozyste, einem kugelförmigen Gebilde aus 150 bis 200 Zellen, das sich eine knappe Woche nach der Befruchtung einer Eizelle und den darauffolgenden ersten etwa acht

Zellteilungen bildet. Die pluripotenten Stammzellen versorgen den größer und komplexer werdenden Embryo mit allen Zelltypen, die er braucht: damit Muskeln wachsen, innere Organe, das Gehirn, Arme oder Beine.

Seinerzeit war es eine große Kunst, die extrem empfindlichen embryonalen Stammzellen – so heißen die pluripotenten Stammzellen, nachdem sie dem Embryo entnommen wurden – im Labor so zu vermehren, dass sie unspezialisiert und genetisch intakt bleiben. Heute gibt es mehr als 500 menschliche embryonale Stammzelllinien – Tendenz steigend. Allerdings werfen die zellulären Alleskönner auch ethische Fragen auf. Schließlich geht der Embryo bei ihrer Entnahme zugrunde. Nicht nur deshalb konzentrierten sich vor allem deutsche Wissenschaftler zu Beginn dieses Jahrzehnts auf adulte Stammzellen, die sich aus verschiedenen Quellen des ausgewachsenen Körpers gewinnen lassen. Doch sie sind nicht pluripotent und können sich deshalb nur zu wenigen bestimmten Zelltypen ausdifferenzieren.

So kam Yamanakas Kunststück gerade recht. Seine iPS-Zellen sind nicht nur pluripotent; sie haben auch die

» Oct4 scheint wie ein Kapitän die Umprogrammierung von Zellen zu bestimmen. Die anderen Gene sind die Matrosen.

Stammzelldiskussion entschärft, weil sie ohne Embryonen gewonnen werden können. Ein großes Problem allerdings blieb: Spritzt man sie Mäusen, so erkranken viele der Tiere an Tumoren. Die Gründe sind nachvollziehbar: Zum einen klinken sich die Viren mit den vier eingebauten Genen Oct4, Sox2, c-Myc und Klf4 wahllos in das Erbgut der Mäuse ein. Dadurch können beispielsweise Krebsgene aktiviert oder Anti-Krebsgene zerstört werden. Zum anderen fördert beispielsweise das eingeschleuste c-Myc-Gen in erhöhter Dosis Tumore. „Für eine therapeutische Anwendung am Menschen kommt das Yamanaka-Verfahren daher nicht in Frage“, erklärt Hans Schöler.

Emsig fahndeten die Max-Planck-Forscher mithin nach Zellen, in denen das eine oder andere der vier Reprogrammier-Gene natürlicherweise aktiv ist. Tatsächlich fanden Jeong Beom Kim und Holm Zaehres im Gehirn er-

wachsener Mäuse adulte Stammzellen, die sich zu verschiedenen Zelltypen des zentralen Nervensystems entwickeln. In diesen sind die Sox2- und c-Myc-Gene bereits angeschaltet. Rasch zeigten die beiden Zellbiologen, dass bereits ein Viren-Cocktail mit Oct4 und Klf4 diese Zellen zu iPS-Zellen umprogrammiert.

WANDLUNG ERFORDERT GEDULD

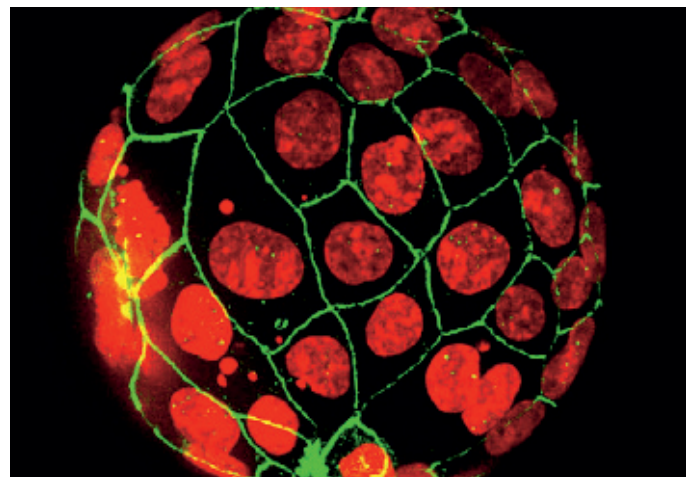
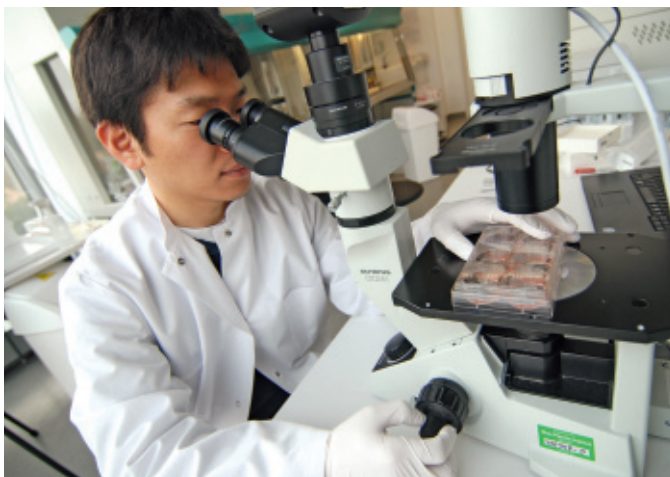
Nur einige Monate später kam dann der nächste Coup aus dem Stammzelllabor in Münster: Oct4 allein genügt, um aus adulten Stammzellen des Mäusehirns iPS-Zellen zu züchten – sofern man sich in Geduld übt. Verfrachtet man nur zwei Reprogrammier-Gene in die Zellen, so dauert die Wandlung mindestens zwei Wochen. Setzt man allein auf Oct4 für den Neustart, verstreichen drei bis vier Wochen, bis die Forscher pluripotente Zellen ernten

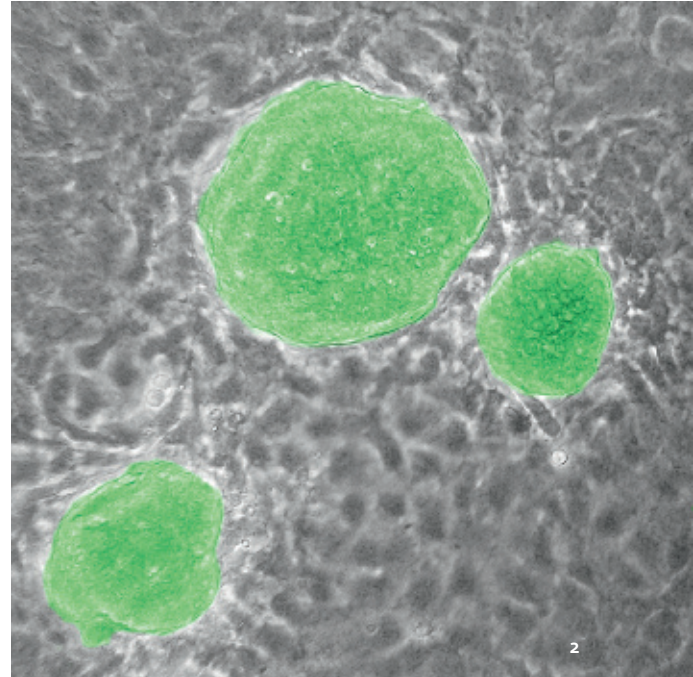
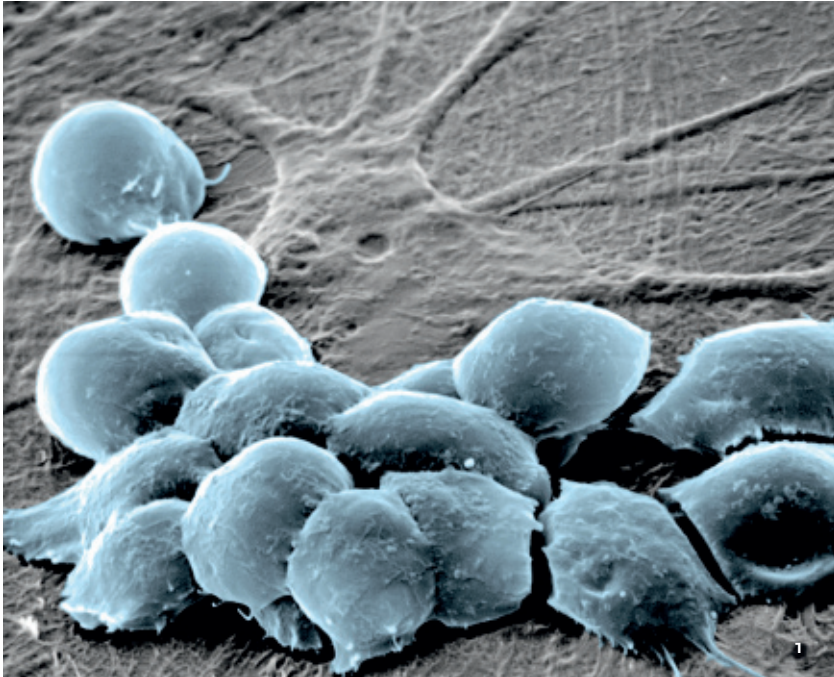
können. Und inzwischen ist es den Münsteranern sogar gelungen, diese Ergebnisse auf Stammzellen des menschlichen Gehirns zu übertragen.

Damit kristallisiert sich heraus, „dass Oct4 wie ein Kapitän die Umprogrammierung von Zellen zu bestimmen scheint“, erklärt Hans Schöler. „Die anderen Gene, wie Sox2, c-Myc oder Klf4, sind die Matrosen.“ Dass Oct4 eine dermaßen zentrale Rolle für die Pluripotenz spielt, hat Schöler bislang nur vermuten können – obwohl er sich seit gut zwei Jahrzehnten mit diesem Molekül und seinen Funktionen beschäftigt.

Genau genommen hat der Biologe Ende der 1980er-Jahre als Erster Oct4 und verwandte Moleküle in den Eizellen von Mäusen entdeckt – seinerzeit am Göttinger Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie. In der Folgezeit stellt sich heraus, dass Oct4 in allen Zellen aktiv ist, „die das Leben von

Der Forscher Jeong Beom Kim (links) beobachtet unter dem Mikroskop einen Mausembryo im Keimbläschenstadium (rechts), das sich etwa fünf bis sechs Tage nach Befruchtung der Eizelle bildet. In Grün werden die Zell-Zellkontakte der äußeren Zellschicht dargestellt, in Rot die Zellkerne.





einer Generation in die nächste tragen und damit quasi unsterblich sind“, wie Schöler sagt. Oct4 ist für den 56-Jährigen auch ein Schlüssel, um die Biologie der Reprogrammierung en detail zu begreifen. „Der Kapitän muss immer an Bord sein“, sagt Schöler, „die Matrosen kann man austauschen.“ Offenbar regulieren sich Oct4, Sox2 und die anderen beteiligten Gene beziehungsweise Proteine gegenseitig. Wie genau, das bleibt einstweilen ein Geheimnis.

VERZICHT AUF VIREN-FÄHREN

Ungeachtet dessen wird die Reprogrammierungs-Technik in rasantem Tempo praxisfreundlicher. Im Frühjahr 2009 berichteten kalifornische Wissenschaftler zusammen mit dem Max-Planck-Team, dass sie Zellen ohne Viren und deren genetische Reprogrammierungs-Fracht in iPS-Zellen umgemünzt haben. Stattdessen schleusten die Wissenschaftler die entsprechenden Proteine direkt in die Hautzellen von Mäusen ein. Das ist nicht trivial, denn zumindest im molekularen Maßstab sind Proteine extrem groß. Doch ein Trick half: Die Wissenschaftler koppelten eine kleine Kette der Aminosäure Arginin an die zuvor eigens in Bak-

terien hergestellten Proteine an. Dieses molekulare „Ticket“ erleichtert deren Eintritt in die Zellen.

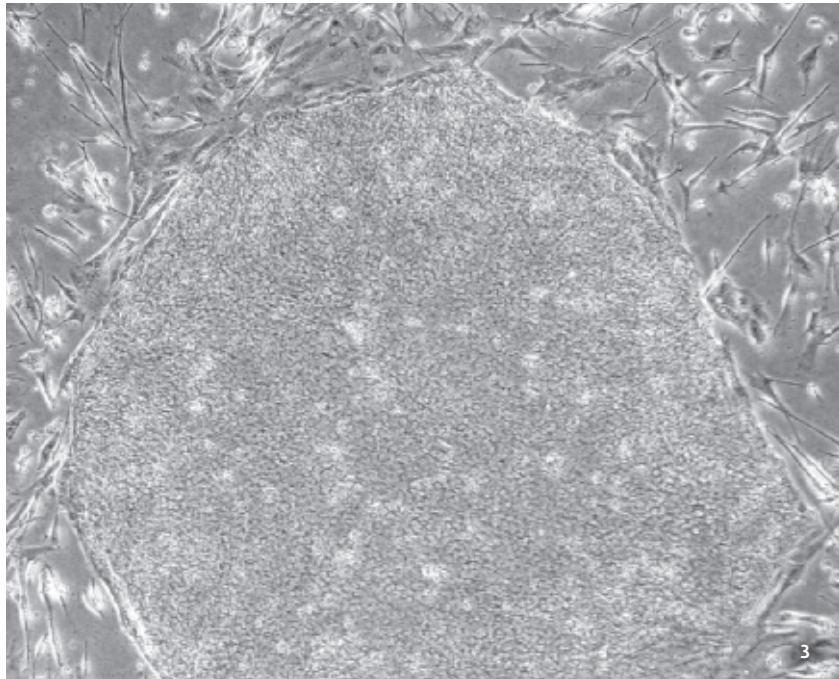
Insgesamt viermal versetzten die Stammzell-Experten die Hautzellen mit dem Cocktail aus Oct4-, Klf4-, Sox2- und c-Myc-Proteinen. Ohne die Dauerbehandlung wären die Zellen immer wieder in ihren alten Zustand zurückgefallen. Dazu gaben die Forscher ein sogenanntes *small molecule* – eine kleine chemische Substanz, die den Proteinen dabei hilft, ihre Funktion zu erfüllen. Nach mehr als einem Monat entdeckten die Forscher dann in manchen Zellen sichere Zeichen der Reprogrammierung. Erstmals war damit bewiesen: Man kann auf den gefährvollen Einsatz der Viren-Fähren verzichten. Die Zugabe der Proteine dagegen birgt nach heutigen Kenntnissen kein Risiko – auch weil die Proteine im Inneren der Zelle recht schnell abgebaut werden. „Pipsee“ haben die Forscher ihre neuen Kreaturen getauft: Protein-induzierte pluripotente Stammzellen (piPS-Zellen).

Selbst wenn noch große Proteinmoleküle nötig sind, so scheint damit vor dem Hintergrund einer therapeutischen Anwendung am Menschen eines der Kernprobleme der Zellreprogrammierung gelöst (tatsächlich haben ko-

reanische Forscher die Methode bereits für menschliche Zellen beschrieben). „Wir haben jetzt den Fuß in der Tür, aber die Methode muss noch wesentlich effizienter werden“, betont Hans Schöler. „Ich warte nur darauf, dass jemand die Reprogrammierung allein mit *small molecules* schafft.“ Also allein mit Substanzen, die leicht in Zellen einzuschleusen sind und die die wichtigsten Reprogrammierungsgene anschalten und somit den pluripotenten Zustand sichern.

„Es würde mich nicht wundern, wenn das bald passiert“, sagt der Max-Planck-Direktor. Anders als beim Einschleusen von Genen lässt sich die Dauer und Stärke der Wirkung kleiner Moleküle viel genauer steuern: Sobald die Zellen erst einmal reprogrammiert sind, kann in ihnen das normale Entwicklungsprogramm ablaufen. Eingeschleuste Viren dagegen bleiben für immer im Erbgut – mit den entsprechenden Risiken.

Derweil hat Schöler schon zum nächsten Paukenschlag ausgeholt: Zellen, die sich fast von selbst in pluripotente Stammzellen verwandeln, isoliert aus den Hoden, einem Organ mit höchst erstaunlichen Eigenarten. Noch im hohen Alter produzieren die Hoden funk-



- 1 Die Forschung mit iPS-Zellen entwickelt sich im rasanten Tempo: Nach und nach werden embryonale Stammzellen – hier von der Maus – durch induzierte pluripotente Stammzellen abgelöst, die aus ausdifferenzierten Zellen gewonnen werden.
- 2 Um sogenannte adulte Zellen in pluripotente Alleskönner umzuprogrammieren, benötigten die Forscher zunächst vier Faktoren (Oct4, Sox2, Klf4, c-Myc). Diese Stammzellen sind auf diese Weise aus Bindegewebszellen der Maus entstanden.
- 3 Da diese Faktoren Krebs auslösen können, wenn sie in Zellen eingeschleust werden, ist es das Ziel der Forscher, möglichst ganz ohne diese Faktoren auszukommen. Dabei gehen die Wissenschaftler auf Nummer sicher: Diese Kolonie menschlicher induzierter pluripotenter Stammzellen wurde bereits nur durch das Einschleusen von Oct4 gezüchtet.

tionstüchtige Spermien. Nicht nur deshalb vermuteten Wissenschaftler, dass sie dort ideales Ausgangsmaterial für eine Reprogrammierung finden könnten.

Zuvor waren bereits unterschiedliche Gruppen auf Zellen im Hoden gestoßen, die sie zu Verwandlungsprozessen animierten.

So glückte es Tübinger Wissenschaftlern, aus menschlichem Hodengewebe wandlungsfähige Zellen zu isolieren. Allerdings ist bis heute nicht zweifelsfrei geklärt, ob die daraus reprogrammierten Zellen wirklich pluripotent sind.

Die Max-Planck-Forscher haben nun im Hoden von Mäusen Keimbahn-Stammzellen aufgespürt, die extrem selten sind: Nur zwei bis drei von 10000 Zellen aus dem Hoden zählen zu diesem Typus. „Wir wussten, dass in diesen Keimbahn-Zellen Oct4 in geringem

Foto: MPI für molekulare Biomedizin (3), Katharina Psathaki (links), Holm Zaehres (Mitte), Jeong Beom Kim (rechts)

SIND SIE WIRKLICH PLURIPOTENT?

Immer wieder berichten Forscher davon, dass sie Körperzellen oder adulte Stammzellen zu pluripotenten Stammzellen („iPS-Zellen“) umprogrammiert haben. Mitunter aber fehlt der zweifelsfreie Nachweis der Pluripotenz – selbst wenn die entsprechenden Resultate in hochrangigen wissenschaftlichen Journalen veröffentlicht wurden. Ein seriöser Nachweis von Pluripotenz fußt auf verschiedenen Tests:

- Nachweis von Marker-Genen: In iPS-Zellen sind Gene wie Oct4 angeschaltet, die in ausdifferenzierten Körperzellen verstummt sind.
- Nachweis der Teratom-Bildung: Injiziert man pluripotente iPS-Zellen unter die Haut von Mäusen, entsteht eine besondere Tumor-Form, das sogenannte Teratom. Diese Geschwulst enthält verschiedene Typen von Körperzellen und ähnelt embryonalen Tumoren mit Bildung der drei „Keimblätter“, aus denen sich verschiedene Gewebearten entwickeln.

- Nachweis der Zelldifferenzierung: Aus iPS-Zellen lassen sich in der Kulturschale im Prinzip alle Zelltypen des Körpers herstellen. Auch hier ist es unabdingbar, Zellen der drei Keimblätter zu züchten und funktionell nachzuweisen.
- Nachweis der Chimären-Bildung: Man spritzt die iPS-Zellen in Maus-Embryonen und beweist, dass sie im heranwachsenden Organismus enthalten sind. Üblicherweise werden die iPS-Zellen mit einem Fluoreszenz-Gen markiert, das sie unter einem Mikroskop als leuchtendes Gewebe sichtbar macht. Der Nachweis von iPS-Zellen, die zu Zellen der Keimbahn herangereift sind, gilt hierbei als besonders wichtig, weil er beweist, dass die Zellen ihre Erbinformation in die nächste Generation tragen könnten.

Den ultimativen Nachweis der grundsätzlichen Pluripotenz von iPS-Zellen haben übrigens im Sommer 2009 chinesische Forscher mit einer besonderen Variante der Chimären-Bildung erbracht: Sie erzeugten aus reprogrammierten Körperzellen lebensfähige Mäuse, die zu fast 100 Prozent von den iPS-Zellen abstammen.

» Wir haben jetzt verschiedene Systeme, um Pluripotenz herzustellen, und sie werden immer besser.

Maße angeschaltet ist“, sagt Schöler, „weil es auch für die Bildung von Spermien wichtig ist.“ Sprich: Der Kapitän für die Pluripotenz ist eigentlich da, aber noch nicht ganz wach, um seine Matrosen ebenfalls zu aktivieren.

Geweckt haben die Wissenschaftler Oct4 mit speziellen Kultivierungsbedingungen. Als sie die Zellen aus dem Hoden kultivierten, fiel ihnen eines auf: Immer wenn ein bestimmter Abstand benachbarte Keimbahn-Stammzellen trennte, programmierten sie sich binnen zwei Wochen in pluripotente Stammzellen um – ohne das Einbringen von Proteinen, fremden Genen oder *small molecules*.

„Wir haben jetzt verschiedene Systeme, um Pluripotenz herzustellen“, resümiert Schöler, „und sie werden immer besser.“ Hinzu kommt, dass Forscher im menschlichen Körper immer neue Quellen von adulten Stammzellen finden, die sich wahrscheinlich hervorragend reprogrammieren lassen und die leicht erreichbar sind. So wurden vor Kurzem adulte neurale Stammzellen im Gaumen gefunden. Die Riechschleimhaut der Nase wäre eine weitere optimale Quelle dafür. Das alles sind prächtige Aussichten, um eines Tages die Vision der ethisch unbedenklichen und medizinisch risikoarmen wie wirkungsvollen regenerativen Medizin zu verwirklichen.

Zunächst aber will Schöler die Resultate klinischer Studien abwarten, die Mediziner mit „klassischen“ embryonalen Stammzellen erzielen. Die erste Studie dieser Art soll demnächst in den USA starten – mit querschnittsgelähmten Patienten. In der geplanten, aber noch nicht von der US-Zulassungsbehörde FDA freigegebenen Pilotstudie soll es vor allem darum gehen, Sicherheitsrisiken einer Therapie mit aus humanen ES-Zellen abgeleiteten Nervenzellen zu klären. „Nach den Vorarbeiten

an Tieren ist es unwahrscheinlich, dass sich Tumore bilden“, glaubt Schöler und hofft auf eine erfolgreiche Studie. Bei querschnittsgelähmten Tieren sind die injizierten neuronalen Abkömmlinge von ES-Zellen an den verletzten Stellen im Rückenmark weiter ausgereift und haben gesundes Gewebe gebildet.

NABELSCHNURBLUT HILFT DEN FORSCHERN

Entsprechende Untersuchungen mit Abkömmlingen von humanen ES-Zellen an Patienten könnten den Wissenschaftlern helfen, eines Tages ähnliche Studien mit iPS-Zellen optimal zu gestalten. Idealerweise würden dabei dem kranken Menschen Zellen entnommen, die im Reagenzglas in iPS-Zellen verwandelt und dann in gesunde Körperzellen nach Wahl ausdifferenziert würden – etwa Herzmuskelzellen für Infarktpatienten oder Nervenzellen für Parkinson-Patienten.

Doch wegen dieses vermutlich kaum zu leistenden Aufwands arbeitet Hans Schöler mit der Nabelschnurblut-Bank in Düsseldorf zusammen. Dort lagern Tausende Proben mit Blut aus Nabelschnüren. Die Vorzüge: Zum einen enthält Nabelschnurblut spezielle Stammzellen (*umbilical cord derived stem cells*). Darüber hinaus ließe sich über eine Art immunologisches Profil abgleichen, welche Proben aus der Nabelschnurblut-Bank besonders gut zu einem potenziellen Empfänger passen würden. Und außerdem ist die in den Zellen enthaltene Erbsubstanz jung, also mit wenigen Schäden behaftet.

Alles ideale Voraussetzungen, um Proben zu nehmen, die die immunologische Bandbreite der Bevölkerung weitgehend abdecken, und die darin enthaltenen adulten Stammzellen umzuprogrammieren. Aus den iPS-Zellen würden die Forscher dann Vorläuferzel-

len für spezialisierte Zellen herstellen – von der Haut- bis zur Herzmuskelzelle –, die sich Patienten mit entsprechenden Erkrankungen einpflanzen ließen. „Das würde sich alles in einem übersichtlichen Rahmen bewegen“, vermutet Schöler, „mit vielleicht 10000 Proben für die gesamte deutsche Bevölkerung.“ Ein derartiges System wäre finanzierbar, praktikabel und effizient.

Doch bis es so weit ist, gehen noch viele Jahre ins Land. Zumindest die ersten Schritte des langen Weges sind die Max-Planck-Forscher bereits gegangen: Sie haben Stammzellen aus menschlichem Nabelschnurblut zu iPS-Zellen reprogrammiert – noch mit der Yamanaka-Methode. Jetzt soll das Gleiche mit dem Protein-Verfahren gelingen. „Daran“, sagt Schöler, „arbeiten wir mit Hochdruck.“ ◀

GLOSSAR

Ausdifferenzierte Zelle

Zelle, die auf eine Aufgabe im Körper spezialisiert ist.

Induzierte pluripotente Stammzellen (iPS-Zellen)

Stammzellen, die aus Körperzellen gewonnen wurden und sich in ebenso viele verschiedene Körperzellen differenzieren können wie embryonale Stammzellen.

Adulte Stammzellen

Stammzellen, die auch in zahlreichen Geweben Erwachsener vorhanden sind. Sie sind nicht pluripotent, lassen sich aber teilweise in iPS-Zellen verwandeln.

Nabelschnurblut-Stammzellen

Die Blutbildung wandert am Ende der Schwangerschaft von der Leber und Milz ins Knochenmark, und zwar durch das Blut des Kindes. Daher finden sich bei der Geburt auch im Nabelschnurblut besonders vermehrungsfähige Stammzellen, die sich auch in besonders viele Körperzellen differenzieren können.

Für Forscher, Entdecker, Wissenschaftler
- und solche, die es werden wollen:

Junge Wissenschaft



Das einzige europäische Wissenschaftsmagazin mit begutachteten Beiträgen junger Nachwuchsforscher.

Wissenschaftliche Erstveröffentlichungen und das Neueste aus Naturwissenschaft, Mathematik, Ingenieurwissenschaft und Informatik.

Nur im Abo. Viermal im Jahr News aus Forschung und Technik, Veranstaltungen, Porträts, Studien- und Berufsprofile.

Abobestellung unter
www.verlag-jungewissenschaft.de

Leseprobe anfordern unter
leseprobe@verlag-jungewissenschaft.de
oder Fax 0211/38548929

www.verlag-jungewissenschaft.de

Die Junge Wissenschaft **sucht junge Forscher**, die junge Wissenschaftler werden wollen. Wenn Du nicht älter als 23 Jahre bist und einen eigenen wissenschaftlichen Beitrag von Gutachtern bewerten lassen und veröffentlichen möchtest, dann melde Dich auf unserer Homepage.



Ungewöhnliche Klänge im Max-Planck-Institut für Eisenforschung: Dierk Raabe testet die Akustik des Treppenhauses. Das Waldhorn war sein Hauptinstrument am Wuppertaler Konservatorium. Nur das Putzen des korrosionsanfälligen Metalls machte dem Schüler keinen Spaß.

Grenzgänger zwischen metallischen Dimensionen

Mit 16 Jahren studierte **Dierk Raabe** Kontrabass und Waldhorn am Wuppertaler Konservatorium. Heute betreibt er als Direktor am **Max-Planck-Institut für Eisenforschung** in Düsseldorf die Quantenrevolution der Werkstoffwissenschaften.

EIN PORTRÄT VON **ROLAND WENGENMAYR**

Hätten sich die Lebensträume des jungen Dierk Raabe erfüllt, dann würde er heute nicht im lichtdurchfluteten Konferenzraum am Max-Planck-Institut für Eisenforschung in Düsseldorf sitzen. Passenderweise geben schwere Eisenträger, die an den Eiffelturm erinnern, der mit viel Glas modernisierten Bauhaus-Architektur ein solides Gerüst. Doch metallische Werkstoffe sind in Raabes Leben Liebe auf den zweiten Blick. Der erste intensive Kontakt war eher abträglich. Das lag an seinem Musikinstrument, einem Waldhorn. „Diese alten Instrumente mussten jede Woche mit so einem ekligen Metallputzzeug gewienert werden“, erzählt er: „Das war eher was für Korrosionsfreunde.“ Der Materialwissenschaftler zählt eindeutig zu den Korrosionsfeinden.

Als 16-Jähriger bestand er die Aufnahmeprüfung am Wuppertaler Musikonservatorium. Auf diesen Weg gebracht hatte ihn vor allem eine engagierte Musiklehrerin. So schien ein Leben als professioneller Musiker zwischen Brahms, Beethoven und Wagner

vorgezeichnet. „Ich bin dann am Nachmittag nach der Schule nach Wuppertal gefahren“, erzählt Raabe. Der sehr persönliche Unterricht am Konservatorium machte ihm Spaß. Er übte fleißig Kontrabass, inzwischen sein Hauptinstrument, und Waldhorn. Nur die Schule interessierte ihn immer weniger: „Ich wollte damals kein Abi mehr machen.“ Doch dann kam die Krise.

VON BRAHMS UND BEETHOVEN ZUR METALLPHYSIK

Dierk Raabe quälte sich mit der Frage, ob er eine falsche Entscheidung für sein Leben getroffen habe. Die frühe professionelle Ausbildung als Musiker machte ihm deutlich, dass sein weiteres Leben sich um „zwei, drei Instrumente“ drehen würde. „Ich muss das vorsichtig ausdrücken, denn ich will ja keinem Künstler auf die Füße treten“, sagt er, „aber das war mir doch ein bisschen zu einseitig.“ Also machte er das Abitur. Über seinen Vater und Onkel, die bei Krupp arbeiteten, war er früh in Kontakt mit dem Thema Stahl gekommen. Nicht zuletzt wegen dieser fami-

liären Vorbelastung studierte er an der RWTH Aachen Metallkunde und Metallphysik. „Das Fach fand ich interessant, weil es zwischen den Ingenieurs- und Naturwissenschaften angesiedelt ist“, erzählt Raabe, „denn zur Lehre gehörten auch Chemie und Physik.“

Offensichtlich war diese Entscheidung richtig, denn einseitig ist sein Forschungsgebiet sicher nicht. Es dreht sich zwar fast alles um metallische Werkstoffe, doch die sind überall; wie kaum andere Werkstoffe formen sie unser Lebensumfeld. „Das ist ja ein sehr altes Gebiet, es geht auf die Bronzezeit zurück“, betont er, „und heute ist es ein Rückgrat-Thema unserer Industriegesellschaft.“ Entsprechend entwickelt sich das Gespräch zum Parforceritt durch unsere technische Kultur. In den folgenden Stunden wird es um Hochtemperaturwerkstoffe für Kraftwerksturbinen gehen, um hochfeste Stähle für Autobleche, Speziallegierungen für Flugzeugfahrwerke, Hüftgelenksimplantate, Goldkontakte in elektronischen Chips und korrosionsfeste Bauteile für Meerwasser-Entsalzungsanlagen. >

oben	Voller Durchblick: Dierk Raabe schaut in die Probenkammer der neuen Atomsonde. Dieses Gerät kann Atom für Atom den Aufbau der winzigen Kristalle in Metallwerkstoffen entschlüsseln.
unten	In der Ultrahochvakuumkammer (Bildmitte) werden die ultrafeinen Probenspitzen aufbewahrt. Im angeflanschten Vakuumrohr (Vordergrund rechts) steckt eine Stange, mit der die Forscher die Proben in die große Analysenkammer (Hintergrund) schieben können. Dort tragen Pulse aus Laserlicht oder elektrischer Hochspannung die Probenspitze Atom für Atom ab. Diese elektrisch aufgeladenen Atome (Ionen) beschleunigt ein elektrisches Feld zu einem flächigen Detektor. Die Flugzeit bis dort enthüllt die Atomsorte, der Einschlagsort auf dem Detektor zeigt ihre ursprüngliche Position im Kristall.

Schnell zeigt sich, dass Raabe mit Mr. Spock aus der Science-Fiction-Serie *Star Treck* ein Lieblingswort teilt: „Faszinierend!“ Sonst hat er mit dem kühl-reservierten Spitzohrträger allerdings nicht viel gemein. Mit leicht rheinischem Zungenschlag sprudelt es aus ihm nur so heraus. Immer wieder springt er vom Tisch auf, skizziert schnell etwas an der Tafel, und schon sitzt er seinem Gast wieder gegenüber. Von seinen Gesprächspartnern erwartet er ganz selbstverständlich die Fähigkeit, in minimaler Zeit ein Maximum an Information aufnehmen zu können. Langeweile kommt jedenfalls nicht auf.

MAN STAUNT, DASS MAN DA WIEDER LEBEND RAUSKOMMT

Sehr früh mahnte Raabe aber auch, „dass man da den roten Faden erkennen muss“. Diese Sorge ist unbegründet. Bei jedem der vielen Beispiele wird klar, dass immer das komplexe Innenleben von metallischen Legierungen im Fokus steht. Das mikroskopische Verhalten dieser Gemische aus Eisen, Nickel, Kohlenstoff, Kobalt, Titan, Chrom, Aluminium und anderen Zutaten aus dem Elemente-Supermarkt des Periodensystems hat die Wissenschaft noch keineswegs völlig verstanden. Deshalb muss die Industrie auch heute noch Strukturwerkstoffe für neue mechanische Anforderungen oder extreme Temperaturen mühsam empirisch entwickeln.

Die Suche nach neuen Werkstoffen gleicht also nach wie vor intelligentem Ausprobieren auf Basis von Erfahrung. Gäbe es eine solide Theorie, könnten Materialwissenschaftler viel zielgerichteter vorgehen und wären zugleich of-

feiner für neue Entdeckungen. „Eine solche Theorie der Entwicklung neuer Legierungen existiert nicht“, sagt Raabe und hat damit auch schon das Traumziel seiner Forschung vorgestellt: „Ich kann erst wirklich neue Werkstoffe gezielt designen, wenn ich als Wissenschaftler genau verstehe, was da passiert.“

Diese Zusammenhänge und die Eigenschaften von Werkstoffen lassen ihn immer wieder staunen. Schon ist er bei Materialien, denen die meisten bedenkenlos ihr Leben anvertrauen. „Nehmen Sie ein Flugzeug“, sagt Raabe begeistert: „Man staunt jedes Mal, dass man da wieder lebend aussteigt!“ Mit seinen Händen veranschaulicht er, wie die Druckkabine aus einer Aluminium-Kupfer-Legierung sich in der dünnen Höhenluft um fast 20 Zentimeter im Durchmesser aufbläht: „Wussten Sie das?“ Dann kommt er zu den Turbinenschaufeln direkt hinter der Brennkammer der Flugzeugtriebwerke, die mit bis zu tausend Grad Celsius glühen. „Man kann seinem Schöpfer nur auf Knien danken, dass die nicht in Kleinteilen hinten rausfliegen“, sagt der Wissenschaftler und lacht.

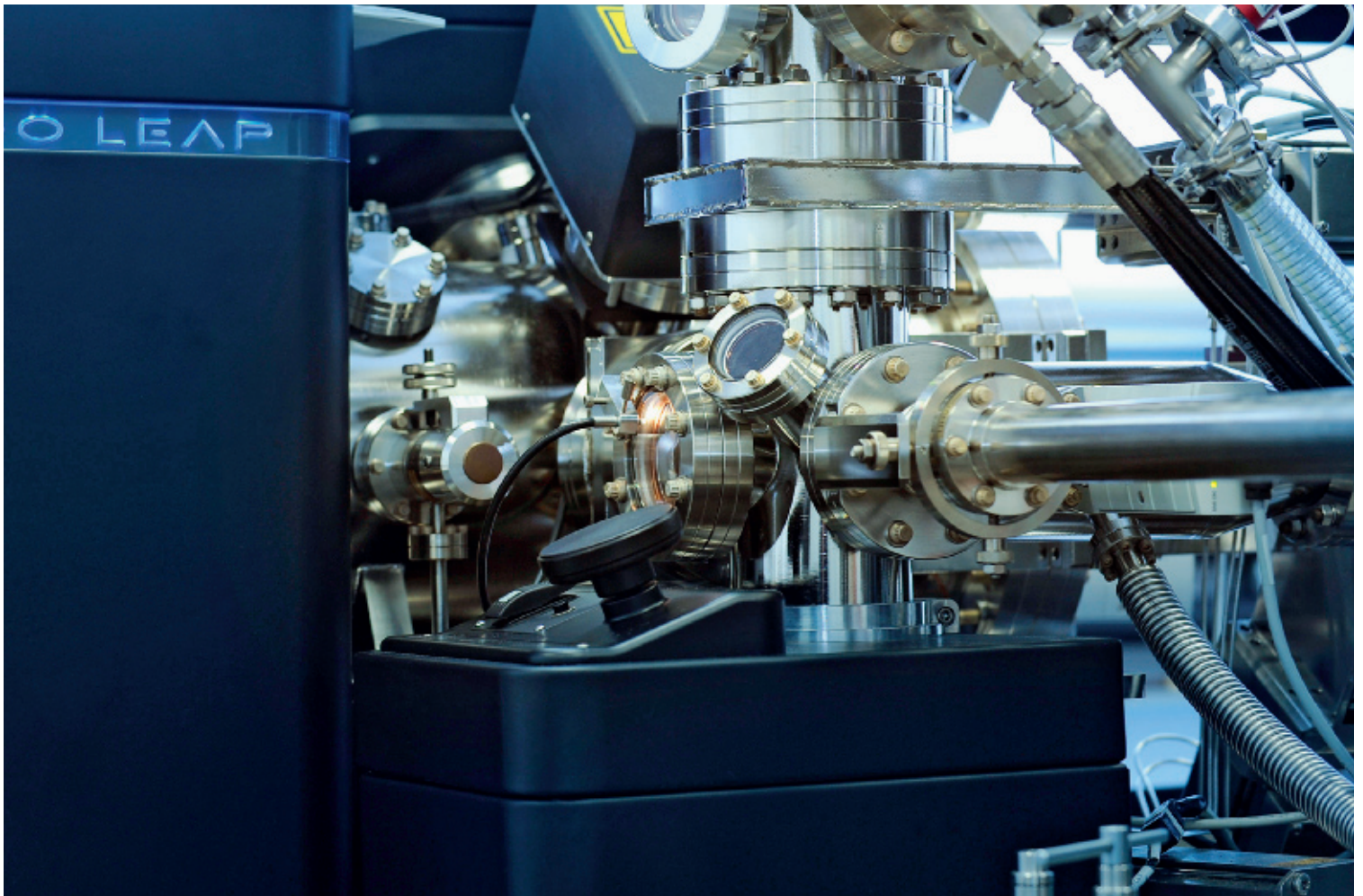
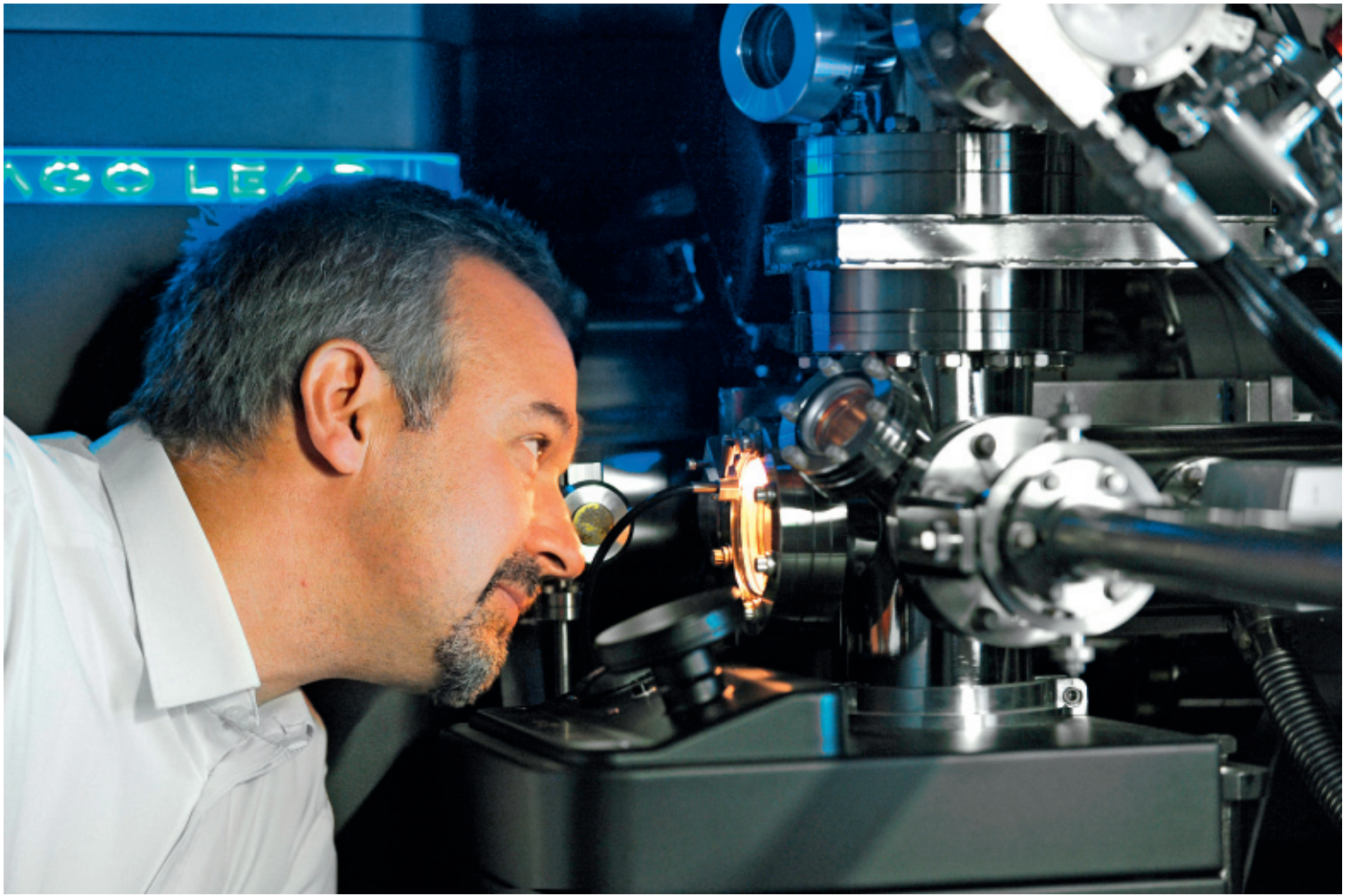
Natürlich weiß er sehr gut, warum das nicht passiert. Doch er will das mechanische Verhalten solcher Werkstoffe tiefgehend verstehen. Und da kommt die Quantenmechanik ins Spiel, die das Verhalten einzelner Atome und Elektronen beschreibt. Ersten Kontakt zu dieser grundlegenden, aber schwer zu verstehenden Theorie bekam der angehende Ingenieur während seines Studiums über eine gute Physikvorlesung. Inzwischen ist sie für ihn ein Arbeitspferd geworden, dank der intensiven Zusammenarbeit mit seinem Direktorenkollegen Jörg

Neugebauer und dessen Theoriegruppe. Der Umgang mit quantenmechanischen Grundlagen ist in der werkstoffwissenschaftlichen Ausbildung ungewöhnlich, denn sie steht an den meisten Universitäten dem Maschinenbau nahe. Wer aber Materialien für große technische Bauteile entwickelt, braucht sich traditionell nicht um einzelne Atome und Elektronen zu kümmern.

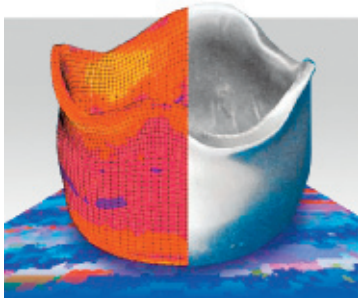
DIE QUANTENTHEORIE WIRD ZUM ARBEITSPFERD

Diese Haltung jedoch wollen Dierk Raabe und seine Institutskollegen radikal ändern. Wenn Raabes Traum in Erfüllung geht, dann wird es den Maschinenbauern wie einst den Elektrotechnikern ergehen: Diese mussten sich bereits nach der Erfindung des Transistors vor rund sechzig Jahren an quantenmechanische Designwerkzeuge gewöhnen. „Mit unserer langfristig angelegten Forschungsarbeit wollen wir dazu beitragen, dass man in vielleicht 15 Jahren Werkstoffe komplett auf Basis der Quantenmechanik entwickelt“, sagt Raabe: „An diese Vision glaube ich knallhart!“

In seiner wissenschaftlichen Karriere entwickelte Raabe schon sehr früh Computersimulationen, mit denen sich die Eigenschaften von Werkstoffen theoretisch vorhersagen lassen. Seit seiner Promotion 1992 in Aachen ist das sein zentrales Forschungsgebiet. Damals arbeitete er am Institut für Metallkunde und Metallphysik als Gruppenleiter. Seine ausgezeichneten Ergebnisse belohnte die Deutsche Forschungsgemeinschaft mit einem renommierten Heisenberg-Stipendium. Damit ging er 1997 nach seiner Habili-



» Mit unserer langfristig angelegten Forschungsarbeit wollen wir dazu beitragen, dass man in vielleicht 15 Jahren Werkstoffe komplett auf Basis der Quantenmechanik entwickelt. An diese Vision glaube ich knallhart!



Metalle fließen beim Umformen nicht gleichmäßig wie zäher Honig, sondern in bevorzugte Richtungen. Diese kritische „Zipfelbildung“ kann die von Raabes Team entwickelte Software realistisch simulieren (links).

tation in die USA. Dort forschte er an der Carnegie Mellon University in Pittsburgh und am Hochfeld-Magnetlabor in Tallahassee in Florida. In der Max-Planck-Gesellschaft war man von Raabes innovativen Methoden so beeindruckt, dass man ihn 1999 mit nur 34 Jahren als einen der jüngsten Max-Planck-Direktoren an das Max-Planck-Institut für Eisenforschung berief.

„Der Vorteil war vielleicht, dass ich zwischen den Ingenieur- und Naturwissenschaften sitze und viel simuliert habe“, erzählt er weiter. Diese komplexen Simulationsprogramme darf man sich aber nicht so vorstellen, dass man in eine Eingabemaske ein paar gewünschte Materialeigenschaften eingibt und danach vom Computer das Kochrezept für eine neue Legierung ausgespuckt bekommt. Die Simulationsprogramme im Werkstoffdesign sind sehr komplex. Allerdings vereinfachen viele Simulationen die Metalle in einer entscheidenden Hinsicht: Sie vernachlässigen die komplizierte Mikrostruktur – so wie Schiffskonstrukteure sich nicht um einzelne Wassermoleküle kümmern. „Man nennt das Homogenisieren“, erklärt Raabe.

Bei vielen Anwendungen sind solche Vereinfachungen legitim. Tatsächlich sind aber Metalle und metallische Legierungen auf komplizierte Weise körnig. Sie bestehen aus vielen kleinen Kristallen, die – je nach Werkstoff – zwischen einigen Mikrometern, einem tausendstel Millimeter und mehreren Millimetern groß sind. In diesen kleinen Kristallen sind die Atome sehr regelmäßig angeordnet, wie in einem Diamanten oder Bergkristall. Bei Legierungen wird die Sache noch komplizierter, weil die atomare Zusammensetzung von Kristall zu Kristall variieren kann.

Das Zusammenspiel dieser Kristallkörner bestimmt aber wesentliche Werkstoffeigenschaften. So kann es zum Beispiel passieren, dass ein Blech beim Kaltumformen, etwa für einen Kotflügel, unschöne Nasen bekommt. Das Metall fließt nämlich in der Presse nicht wie ein zäher Honig gleichmäßig überallhin, sondern bevorzugt bestimmte Richtungen. Daran sind die kleinen Kristalle schuld. Sie geben wegen ihrer geschichteten Atomlagen in einer Vorzugsrichtung nach – wie Sandwiches, deren Brotscheiben sich auf dem glitschigen Belag am liebsten parallel zueinander verschieben.

AUDI UND MERCEDES NUTZEN DAS SIMULATIONSPROGRAMM

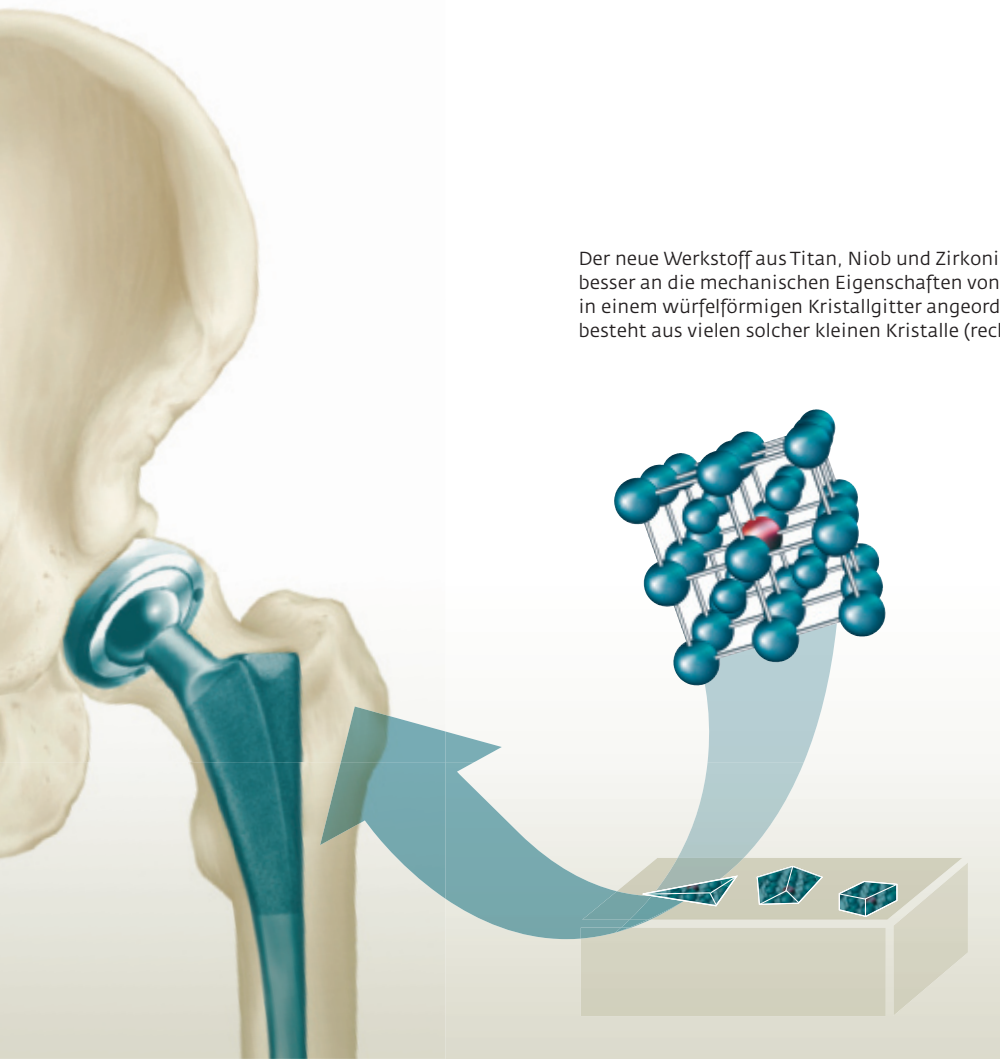
Für die Automobilindustrie mit ihrem Hang zu immer kniffliger gefalteten Karosseriedesigns stellt das ein wachsendes Problem dar. Deshalb hat Raabe mit seinem Team vor einigen Jahren ein Simulationsprogramm entwickelt, das Autobauer wie Audi und Mercedes heute einsetzen. Sie berechnen damit das Verhalten von Stahlsorten in den Pressen voraus. Das spart teure Tests und hohe Ausschussraten beim Anfahren der Produktionslinien für ein neues Modell.

Die Düsseldorfer haben einen geschickten Weg gefunden, in ihrem Simulationsprogramm das Verhalten der kleinen Kristalle auf das Umformverhalten ganzer Werkstücke zu übersetzen. Müsste der Computer Körnchen für Körnchen das Zusammenspiel vieler Millionen virtueller Kristalle simulieren, würde er zu lange brauchen. Deshalb kam Raabes Team auf die Idee, jeweils alle Kristalle mathematisch zusammenzufassen, die in die gleiche



Foto: Frank Vinken (2)

Dierk Raabe erklärt an der Tafel, wie die neue Atomsonde funktioniert. Die Wissenschaftler wollen damit den atomaren Aufbau komplexer Metalllegierungen präzise entschlüsseln.



Der neue Werkstoff aus Titan, Niob und Zirkonium passt Hüftgelenksimplantate besser an die mechanischen Eigenschaften von Knochen an. Die Atome sind in einem würfelförmigen Kristallgitter angeordnet (rechts oben), der Werkstoff besteht aus vielen solcher kleinen Kristalle (rechts unten).

Richtung orientiert sind – schließlich zeigen sie das gleiche Fließverhalten. Das verkürzte die Rechenzeit um den Faktor hundert.

DAS MULTISKALENPROBLEM

Nicht nur die unterschiedlichen Größenordnungen vom Atom über mikrometergroße Kristalle bis zum metergroßen Werkstück ergeben ein kompliziertes „Multiskalenproblem“, wie Raabe das nennt. Noch extremer dehnt sich die Spanne der Zeitskalen: Sie reicht von den Bewegungen der Elektronen innerhalb von Femtosekunden, Billiardstel Sekunden, bis zu Jahren, in denen ein Werkstück korrodiert oder durch Kriechen einer Dauerbelastung nachgibt.

„Diese Skalen sind mit Rechner-simulationen nicht zu überbrücken, auch in dreißig Jahren nicht“, sagt Raabe: „Also müssen wir das theoretisch überbrückbar machen.“ Dabei

hilft den Düsseldorfern eine Entdeckung: Die genaue quantenmechanische Beschreibung dessen, was sich auf der mikroskopischen Skala zwischen wenigen Atomen in den kleinen Kristallen abspielt, kann schon gute Aussagen liefern. Ein Beispiel sind die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs. „Die ersten Arbeiten hier zusammen mit den Kollegen von der Theorie haben eine Präzision in der Vorhersage bestimmter Phänomene erzielt, die mich echt verblüfft hat“, erzählt Raabe. Mit der sehr anspruchsvollen Anwendung der Quantentheorie beschäftigt sich das Team des Direktorenkollegen Jörg Neugebauer. Die Zusammenarbeit klappt prima: „Wir träumen so ziemlich dieselben wissenschaftlichen Träume“, so Raabe.

Beim quantenmechanischen Werkstoffdesign geht es zentral um die Elektronen. Sie bilden den Kleber, der die Atome zusammenkittet. Diese Klebefkräfte kann die Quantenmechanik

auf der atomaren Skala sehr präzise beschreiben. Aus den Formeln lässt sich direkt ableiten, wie sich der Kristall zum Beispiel mechanisch verhalten wird. Nun besteht ein großes, „makroskopisches“ Werkstück zwar aus vielen Kristallen, doch diese legen die Grenzen der Werkstoffeigenschaften fest – so wie eine Kette nur so stabil wie ihre einzelnen Glieder sein kann.

„Mein Traum ist das elektronische Design von Werkstoffen“, erklärt Raabe. Gegenüber den empirischen Entwicklungsmethoden hat dieser elementare theoretische Ansatz eine große Stärke: Er ermöglicht es, völlig neue Werkstoffe zu entwickeln. Die Empirie dagegen kann nur bereits Bekanntes variieren.

VÖLLIG NEUE TITANLEGIERUNG FÜR HÜFTIMPLANTATE

Dierk Raabe will Maschinenbauer und traditionell ausgerichtete Werkstoffwissenschaftler von den Möglichkeiten des quantenmechanischen Ansatzes überzeugen. Dazu sollen beeindruckende Demonstrationsprojekte dienen. Eines ist eine völlig neue Titanlegierung für Hüftgelenksimplantate. „Pro Jahr erhalten rund eine Million Menschen weltweit so eine künstliche Hüfte“, erklärt Raabe. Leider lockern sich die neuen Gelenke nach einigen Jahren und müssen ersetzt werden. Das Problem ist der Knochen, der sich zurückbildet. Titan ist gut fünfmal steifer als Knochen, deshalb nimmt das metallische Gelenk wesentlich mehr Kräfte auf. Wie ein Muskel, der nicht mehr trainiert wird, baut daraufhin der unterforderte Knochen ab.

Den Düsseldorfern gelang es, eine wesentlich weichere Titanlegierung zu entwickeln. Sie passt sich mechanisch viel besser an den Knochen an, weil sie eine andere Kristallstruktur als Titan besitzt. Möglich war die Entwicklung dieses völlig neuen Werkstoffs aus bioverträglichem Titan, Niob und Zirkonium nur mithilfe der Quantenmechanik. Die Düsseldorfener verhandeln bereits mit Herstellern solcher Prothesen.

Die gesellschaftliche Relevanz seiner Forschung spielt für Raabe eine große Rolle. Auf die Titanlegierungen kamen die Düsseldorfener allerdings auch, weil diese auf der atomaren Ebene noch relativ einfach beschreibbar sind. „Es war also in mehrerer Hinsicht eine strategische Entscheidung“, sagt Raabe. Er träumt allerdings schon davon, viel komplexer aufgebaute Hochtemperaturwerkstoffe noch hitzefester zu machen. Das sind Gemische aus gut einem Dutzend verschiedener chemischer Elemente. Motiv sind die riesigen Turbinen in heutigen Kohlekraftwerken: Könnte man deren Betriebstemperatur „von etwa 580 auf 720 Grad Celsius erhöhen“, so Raabe, dann würden sie Kohle wesentlich effizienter in Energie umwandeln und erheblich weniger Kohlendioxid in die Luft blasen. „Für eine Kilowattstunde Strom muss ich dann nicht mehr ein halbes Kilo Kohle da hineinschütten“, sagt Raabe: „Das könnte weniger als ein Drittel Kilo sein!“

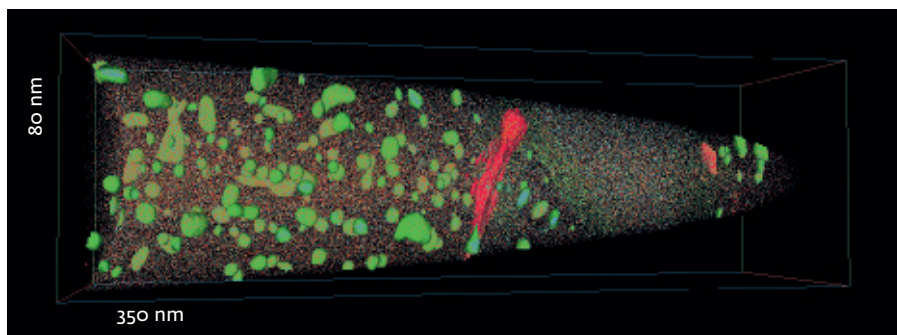
Vor vier Jahren verlieh die Deutsche Forschungsgemeinschaft Raabe den Gottfried-Wilhelm-Leibniz-Preis. Dieser höchstdotierte deutsche Wissenschaftspreis bescherte ihm 1,55 Millionen Euro an zusätzlichem For-

schungsbudget. Von diesem Geld hat er nun auch ein Gerät angeschafft, das Atomsonde heißt. Es kann anhand einer feinen Materialprobe ermitteln, auf welchen Plätzen der Kristallstruktur die verschiedenen Atome genau sitzen. Mit diesen Daten hofft Raabe, auch die Hochtemperaturstähle der quantenmechanischen Berechnung zugänglich zu machen.

Wenn Raabe von seinen vielen Projekten, Partnerschaften und Kontakten zu anderen Wissenschaftlern erzählt, zeigt sich der leidenschaftliche Kommunikator und Netzwerker. Ob er das wäh-

rend seiner Zeit als Orchestermusiker gelernt hat? Nach kurzem Nachdenken bestätigt er, dass es da eine Verbindung zur Wissenschaft gäbe: Künstler seien auch ausgeprägte Individualisten und doch müssten sie sich zu einem gemeinsamen Wohlklang zusammenfinden.

Wichtig ist ihm zudem die Kreativität, die ein Musikstudium vermittelt. Zum Musikmachen kommt er allerdings kaum noch. „Die Atmosphäre an unserem Institut ist so gut“, lacht er, „dass ich mich zu Hause dann doch lieber mit einem wissenschaftlichen Thema beschäftige, als Musik zu machen.“ ◀



Dierk Raabe vor der leistungsfähigen Computeranlage zur Datenauswertung der Atomsonde. Sie muss die Sorten und die Kristallpositionen von 10 bis 100 Millionen Atomen pro Analyse aus den Messdaten errechnen. Dabei entstehen Grafiken, die etwa das stark vergrößerte atomare Innenleben einer superfeinen nadelspitzenförmigen Probe in einer Atomsonde zeigen. Dieses Gerät kann aufdecken, an welchen Positionen des atomaren Kristallgitters die verschiedenen Atome (unterschiedliche Farben) einer Legierung im Kristallgitter sitzen.



Gleichgewicht auf Staub gebaut

Ob Knochen, Zähne oder Perlmutter – die Evolution hat für jede Aufgabe das passende Material erfunden. Davon zeugen auch die Otoconien: winzige Steinchen im Gleichgewichtsorgan, deren Struktur, Entstehung und Funktion **Rüdiger Kniep**, Direktor am **Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe** in Desden, untersucht. Damit könnte er auch helfen, Störungen des Gleichgewichtssinns zu behandeln.

TEXT **TIM SCHRÖDER**



Modell eines Gehörsteinchens (Otoconium). Es besteht zunächst aus einem Bauch (Kugel) und insgesamt sechs Kegeln, an die sich dann später weiteres Material anlagert (unten).

Dass Rüdiger Kniep zu den Otoconien kam, ist einer dieser seltenen Zufälle. 1985 klopfte ein Hals-Nasen-Ohren-Arzt an seine Labortür in Düsseldorf. Er stellte Kniep ein Gläschen auf den Tisch. Ein wenig Staub war darin, Otoconien, nur wenige Mikrometer große Partikel aus dem Gleichgewichtsorgan eines Meerschweinchens. Kniep hatte noch nie davon gehört. Er ist Festkörperchemiker. Er erforscht, wie sich Atome zusammenfügen, wie sie aneinanderbinden oder wie sich neuartige Kristalle bilden. Kniep forscht an den Grundlagen der Chemie, weit weg vom Gleichgewichtsorgan der Säugetiere.

Doch Kniep hatte etwas, was es damals nur in wenigen Labors gab – ein Rasterelektronenmikroskop, eine jener mannshohen Apparaturen, die winzige Objekte mit einem Elektronenstrahl abtasten und damit kleine Strukturen sichtbar machen – die Oberfläche von Kristallen oder Borsten am Ameisenbein. Der HNO-Mediziner wollte damit

Otoconien aufnehmen und enträtseln, wie sie aufgebaut sind und funktionieren. Kniep schlug ein. Sein Assistent machte einige Dutzend Bilder. Eigentlich wäre das alles gewesen. Doch als Kniep die Bilder sah, durchzuckte es ihn: Die staubkorngroßen Krümel entpuppten sich als perfekte geometrische Körper; dicke kleine Reiskörner, deren Spitzen auf drei Seiten abgeplattet sind.

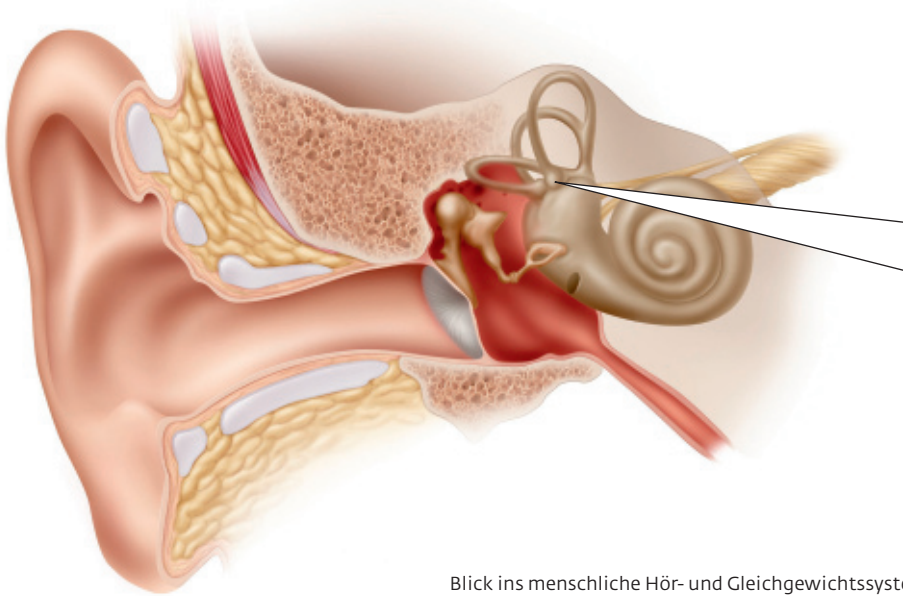
BIOMINERALIEN STECKEN AUCH IN ZÄHNEN UND KNOCHEN

Gewöhnlich wachsen perfekte Kristalle in Gesteinen oder im Reagenzglas. Zucker und Salz bilden Kristalle. Und meist sind diese ausschließlich von ebenen Flächen begrenzt. Die Otoconien aber sind zugleich rundlich und an ihren Spitzen von ebenen Flächen begrenzt. Derart Ungewöhnliches entsteht im Ohr.

Ein Jahr lang grübelte Kniep, wie es der Organismus schafft, Otoconien wachsen zu lassen. Wie finden die bio-

logischen Mineralien im Körper ihre Form? Er dachte über den inneren Aufbau nach, brütete stundenlang über den Bildern, er zeichnete – und packte den Aktenordner schließlich unverrichteter Dinge in den Schrank. Der Laboralltag musste weitergehen. Damals waren Halbleitermaterialien ein großes Thema und die waren nicht weniger spannend.

Wahrscheinlich wäre die Otoconien-Akte für immer im Archiv verschwunden, wenn es im Sommer 2006 nicht diesen einen Zufall gegeben hätte: Schon längere Zeit hatte Rüdiger Kniep nicht mehr nur die Eigenschaften von metallisch leitenden oder halbleitenden Materialien erforscht, sondern damit begonnen, Biominerale zu untersuchen, die harten Naturstoffe, aus denen Zähne oder Knochen wachsen. Vor allem mit Apatit hatte er experimentiert – einem Mineral, das in Gesteinen, aber auch in Knochen und Zähnen vorkommt. Es besteht vor allem aus Calcium und Phosphat. Wird



Blick ins menschliche Hör- und Gleichgewichtssystem. Die Bogengänge vermitteln den Gleichgewichtssinn in den drei Raumebenen. An ihrer Basis befinden sich die Otoconien, rechts in einer rasterelektronenmikroskopischen Aufnahme.

es im Zahn verbaut, kommt noch ein wenig Kollagen hinzu – große Eiweißmoleküle, die als Gerüststruktur dienen, an die sich der Apatit anlagert. Komposite nennt man diese organisch-mineralischen Verbünde.

RUNDLICHE REISKÖRNER MIT ABGEPLATTETEN SPITZEN

Tatsächlich gelang es dem Forscher, künstlichen Zahnschmelz zu erzeugen – und daraus eine Art Reparaturkitt für Zähne zu entwickeln. Doch Kniep genügt das nicht, denn der Apatit im Zahn enthält zusätzlich Carbonat. Wer naturgetreuen Apatit erhalten will, füge dem Experiment also eine Prise Carbonat hinzu, dachte sich Kniep. Tagelang ließ er in seiner Laborapparatur Calcium, Phosphat, Carbonat und andere Agenzien über Gelatine, die aus nichts anderem als Kollagen besteht, strömen. Als er schließlich die entstandenen Feststoffe untersuchte, traute er seinen Augen nicht. In der Apparatur fand er nicht nur Apatit-, sondern auch winzige Calcium-Carbonat-Kristalle. Und die hatten eine ihm sehr vertraute Form: rundliche Reiskörner mit abgeplatteten Spitzen! Ein Déjà-vu. 21 Jahre nach dem Besuch des HNO-Arzt hatte das Experiment künstliche

Otoconien hervorgebracht – so präzise und schön wie ihre natürlichen Vettern. Kniep war elektrisiert.

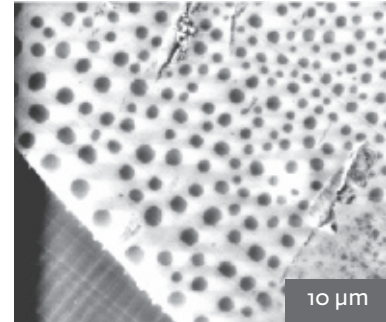
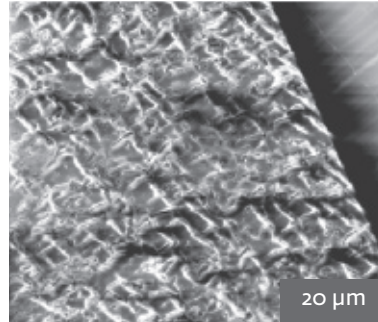
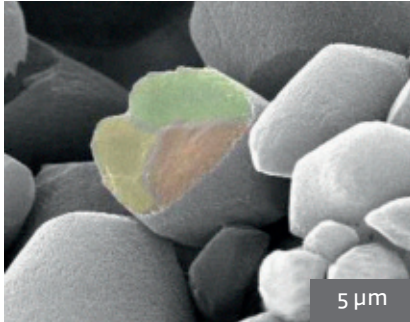
Der Forscher schnappte sich den alten Aktenordner und schlug erneut das Kapitel Otoconien auf. Jetzt wollte er endgültig herausfinden, mit wem er es da zu tun hatte. Die Zutaten kannte er nun. Viel mehr aber wusste er nicht. Kniep arbeitete sich durch die Literatur. Das Ergebnis war erstaunlich. In 20 Jahren hatte sich kaum jemand mit dem Thema befasst. „Man wusste, wo Otoconien sitzen, wie sie aussehen, und hatte eine ungefähre Ahnung von ihren Inhaltsstoffen und ihrer Funktion – das war alles“, sagt Kniep.

Schon lange war bekannt, dass Otoconien im Labyrinthorgan im Innenohr sitzen, dem Gleichgewichtsorgan der Säugetiere und des Menschen. Das Organ gleicht einer abstrakten Tuba mit mehreren Windungen. Die Otoconien ruhen in zwei wenige Millimeter kleinen mit Flüssigkeit gefüllten Kammern, den Maculae, auf einer Art Gelkissen. Winzige Halteseile, Fibrillen, halten die Otoconien in Position auf dem Kissen. Darunter ragen, durch eine dünne Schicht getrennt, feine Sinneshäärchen auf. Bekannt war bereits, dass die Otoconien als Beschleunigungssensor arbeiten – als winzige Massen, die ihre

Lage verändern, wenn sich Kopf und Körper bewegen. Diese Bewegung übertragen sie auf die Sinneshäärchen. Wie die Mikrometerkrümel, die Otoconien – zu Deutsch der „Ohrenstaub“ – wachsen oder wie sie im Detail arbeiten, blieb aber offen.

Kniep machte sich daran, den Ohrenstaub zu erkunden. Zunächst sah er den künstlichen Otoconien im Labor beim Wachsen zu. Kniep ist seit 1998 Direktor am Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe in Dresden. Sein Biomineral-Labor ist sauber, überschaubar und vor allem kostengünstig, sagt er. Denn weder die Apparate noch die Agenzien sind teuer – Calcium, Phosphat, Carbonat oder auch Fluor sind Allerweltschemikalien. Als Kollagen-Komponente nutzt der Forscher Gelatine, die er in Wasser auflöst.

Eines der wichtigsten Geräte ist das U-Rohr, in dem Kniep und seine Mitarbeiter Komposite züchten. Das besteht aus zwei L-förmigen Glasschenkeln, die zu einem U zusammengesteckt werden. In der Mitte sitzt das Gelatine-Gel. Die beiden Schenkel befüllen die Chemiker mit Chemikalienlösungen, deren Inhaltsstoffe ins Gel diffundieren und dort zum Feststoff reagieren. Auf diese Weise entstanden Knieps erste Otoconien, und ganz ähnlich ließ er auch die



- oben | Die Bruchflächen an einem Otoconium aus einem Meerschweinchen (links); die Flächen entsprechen drei der Kegel im Frühstadium der Entwicklung (siehe Abbildung auf Seite 73), an die weiteres Material angelagert wird. Der Bauch eines künstlichen Otoconiums kann durch seine poröse Oberfläche Flüssigkeit aufnehmen und wie ein Schwimmring wirken (Mitte). Dagegen verleiht ihnen die dichtere Struktur an den Enden mehr Gewicht (rechts). Alle Aufnahmen entstanden am Rasterelektronenmikroskop.
- unten | Annu Thomas mit einem U-Rohr. Es enthält in der Mitte ein Gel aus Gelatine, in das Substanzen aus den beiden Lösungen links und rechts diffundieren. So kann die Doktorandin beobachten, wie künstliche Otoconien wachsen.

Nachfolger wachsen. Die Detailuntersuchungen sind dann allerdings aufwendig – und vor allem wegen der Analyseapparate recht teuer.

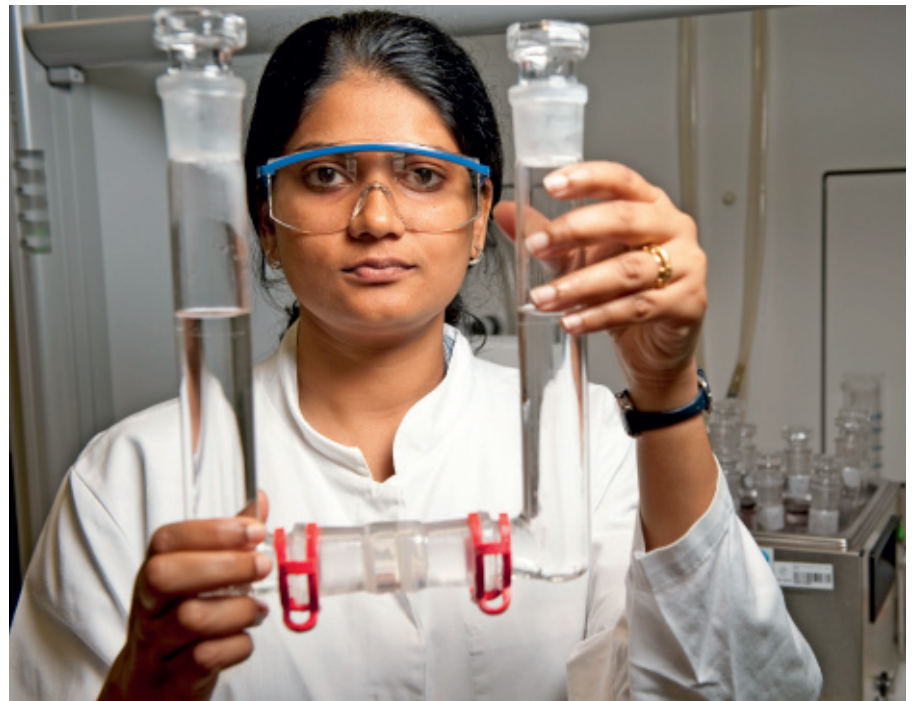
WACHSTUMSPROZESS IM LABOR ENTSCHLÜSSELT

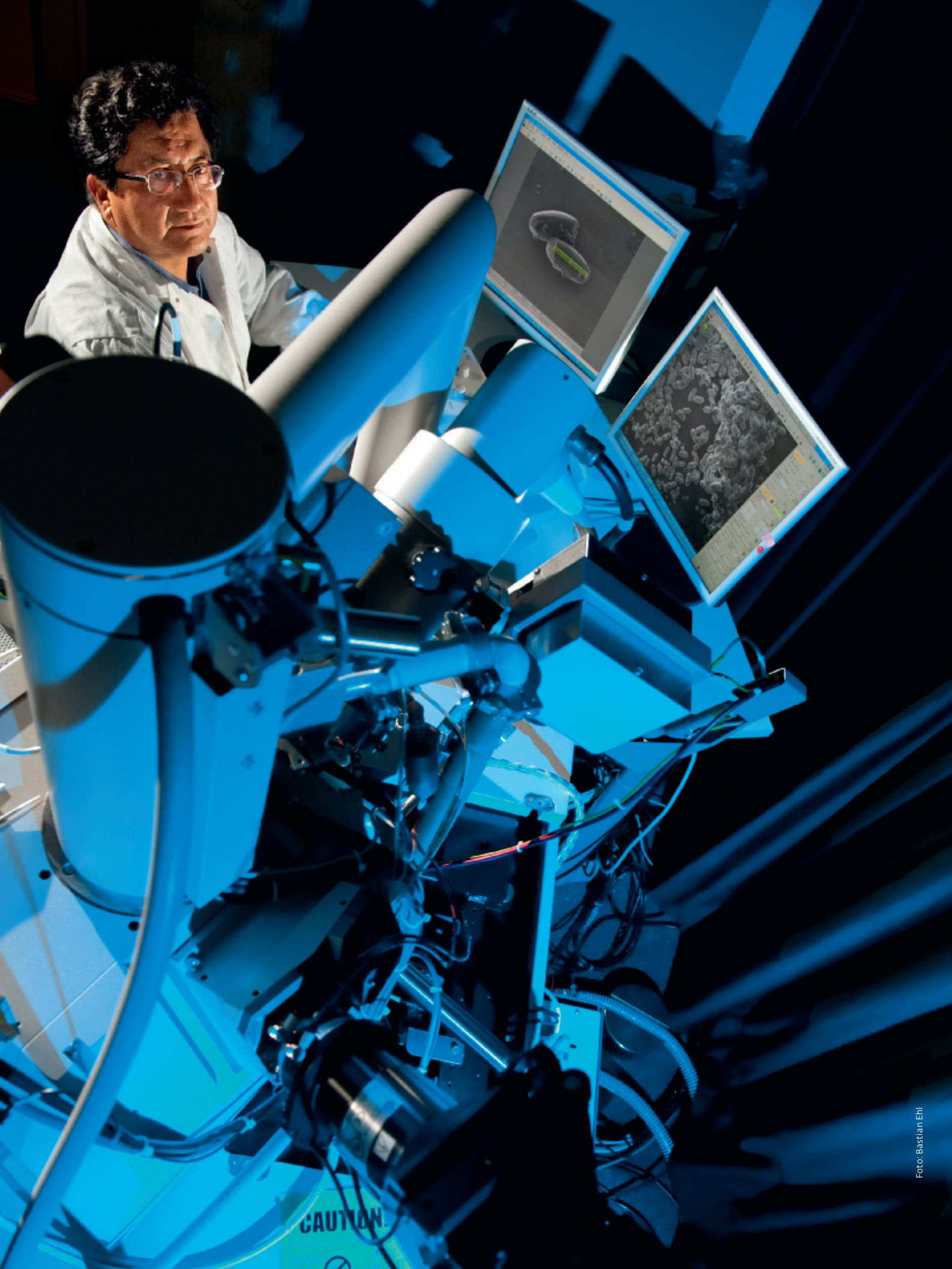
Um die einzelnen Wachstumsstadien zu analysieren, stoppte Kniep die Kristallbildung zu verschiedenen Zeitpunkten. Dann legte er die Krümchen unter das Elektronenmikroskop. Auch das brachte eine kleine Überraschung. Die Otoconien aus dem U-Rohr wachsen in unterschiedlichen Richtungen unterschiedlich schnell. Zuerst wachsen von einem zentralen Punkt aus sechs Kegel, die sich im Zentrum alle mit ihren Spitzen berühren. Jeweils drei orientieren sich zu einer Seite. Um das Zentrum entwickelt sich der Bauch, der langsamer wächst als die Kegel.

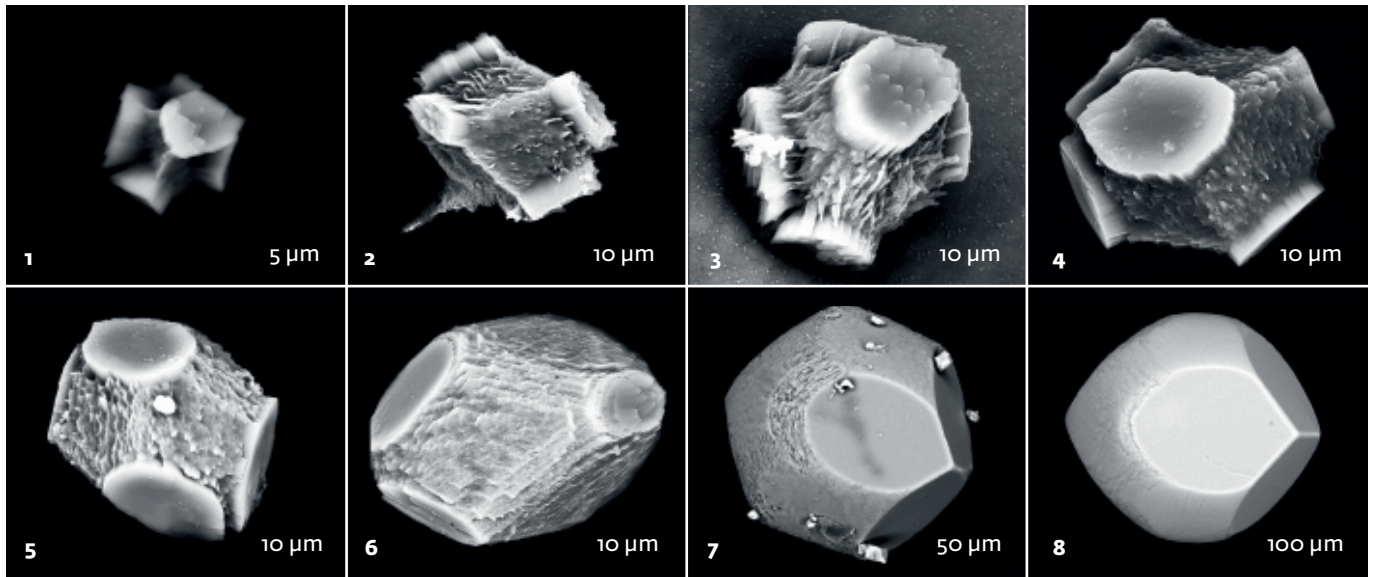
Zwar sind die künstlichen, der Natur nachempfundenen „biomimetischen“ Otoconien etwas größer als die natürlichen „biogenen“, sie wachsen aber ebenfalls innerhalb nur weniger Tage. „Natürliche Otoconien sind bereits etwa sieben Tage nach der Geburt zur vollen Größe herangewachsen“, sagt Kniep. Danach finden keine Neubildungen

oder Wachstumsveränderungen mehr statt. Für Kniep war das auch ein Hinweis darauf, dass seine gezüchteten Calcit-Körnchen durchaus mit dem natürlichen Vorbild vergleichbar sein könnten. Erkenntnisse aus dem Labor dürften sich damit am Ende vielleicht sogar auf die Natur übertragen lassen.

Kniep ist Grundlagenforscher und gesteht durchaus ein, dass Außenstehende seine Forschung auf dem Gebiet der Festkörperchemie meist als wenig spannend empfinden. Chalkogenide – Metallverbindungen mit Sauerstoff, Schwefel, Selen und Tellur –, Nitride und andere Verbindungen, oder Wachs-







oben | Wachstum im Zeitraffer: Ausgehend vom frühesten Stadium mit sechs trompetenähnlichen Fortsätzen (nur teilweise sichtbar, Bild 1) wachsen die Otoconien innerhalb weniger Tage zu ihrer endgültigen Form (Bild 8). Sie weisen dann drei ebene Seiten an jedem Ende und eine gekrümmte Bauchfläche auf.

links | Winzlinge unter dem Mikroskop: Mithilfe eines FIB-Mikroskops (*Focussed Ion Beam*) beobachtet Wilder Carillo die Gehörsteinchen.

tumsbedingungen und Eigenschaften von kristallinen Stoffen liegen weit abseits des Alltags. Doch bei den Biomineralien ist das anders. „Ich habe mir damals mit dem System Apatit – Gelatine gezielt ein Thema herausgesucht, das nah am Menschen ist. Knochen- und Zahnbildung. Das ist spannend. Das ist mein Hobby“, sagt Kniep. „Ich hoffe, etwas beizutragen, was dem Menschen unmittelbar nützen kann.“

MINERALE IN DER NAHRUNG BESTIMMEN DAS ZAHNMATERIAL

Letztlich war es sein Mineralogie-Professor, der Knieps Blick unbewusst auf die Biominerale lenkte, lange bevor das Thema größere Bedeutung erlangte. „In meiner Mineralogie-Diplomprüfung 1971 hat mich mein Professor gefragt, was denn wohl der Grund dafür sei, dass unsere Zähne aus dem Mineral Apatit bestünden und nicht aus Quarz, der ja viel härter sei“, erzählt Kniep. „Ich habe damals irgendetwas von pH-Wert und Säure im Mund gemurmelt.“

Natürlich gibt es eine plausible Erklärung. Calcium und Phosphat nimmt der Mensch permanent über die Nahrung auf, jene Elemente, aus denen der Apatit besteht. Gleiches gilt für Carbonat, den Baustoff des Calcits. Quarz hingegen besteht aus Siliziumdioxid, aus Sand, den der Mensch in gelöster Form eher selten zwischen die Zähne bekommt. Es liegt also nahe, dass der Organismus deshalb nicht Quarz, sondern Apatit synthetisiert. „Sicher ist, dass die Natur nichts ohne Grund macht. Die Wahl der Baumaterialien, die Form von Zähnen oder Otoconien sind das Ergebnis der Jahrtausende langen Optimierungsprozesse der Evolution. Und wir versuchen die Frage zu beantworten, worin der Vorteil liegt“, sagt der Forscher.

Nachdem die Wachstumsexperimente im Labor enthüllt hatten, dass die Otoconien aus zwei verschiedenen Strukturen bestehen, dem Bauch und sechs mit ihren Spitzen aufeinanderstehenden Kegeln, drang Kniep tiefer in ihre Struktur ein. Er zerschnitt die Körnchen direkt im Übergangsbereich

zwischen dem Bauch und den Rhomboedern an den Enden der Otoconien. Im elektronenmikroskopischen Bild zeigte sich, dass das genau richtig war, denn Bauch und Rhomboeder besitzen eine gänzlich andere Feinstruktur.

PORÖSER BAUCH WIRKT ALS SCHWIMMREIFEN

Der Bauch ist porös, und die Kollagenfasern liegen in ihm nur schlecht geordnet. Die Rhomboeder aber, die sich aus den anfänglichen Kegeln an den Enden der Otoconien bilden, sind dicht von parallel ausgerichteten Biomolekülen durchzogen, die senkrecht durch die glatten Flächen stoßen. Kniep ahnte, welchen Grund das haben könnte. Der poröse Bauch nimmt vermutlich Macula-Flüssigkeit, also Endolymphe, auf und wirkt als eine Art Schwimmreifen. Die dichten und massereichen Rhomboeder an beiden Enden des Reiskorns hingegen könnten als Pendelgewichte wirken, die auf Beschleunigungen reagieren und die Otoconien entsprechend kippen oder rotieren lassen. >



20 000-mal größer als das Original: Rüdiger Kniep mit einem Otoconien-Modell.

Kniep hat damit eine erste Erklärung für die unterschiedlichen Strukturen und Dichten im Bauch und in den Enden der Otoconien. Vor einiger Zeit hat er die Keimbildung von Apatit an Gelatine, dem Zahnbaustoff, simuliert. Darin lagern sich jeweils drei Proteinkomplexe zu einer Tripelhelix aneinander, einer länglichen Dreifachschraube. An diesen Dreifachschrauben bilden sich dann nur wenige Nanometer (millionstel Millimeter) große Apatit-Kerne. Ganz ähnlich, sagt Kniep, dürfte das beim Otoconien-Calcit ablaufen. Wie aber im Labor die unterschiedlichen Bereiche mit streng geordneten Kollagen-Fasern in den rhomboedrischen Enden und ungeordneten Fasern im Bauch der Otoconien entstehen, ist bislang noch unklar.

Mit seinen Untersuchungen hat Kniep die Tür zum tieferen Verständnis der Otoconien-Funktion ein gutes Stück aufgestoßen. Er vermutet, dass aus der Außenhülle der Otoconien, insbesondere aus den Rhomboidflächen, wohlgeordnet lang gestreckte Eiweißmoleküle herauswachsen, Molekülfib-

rillen. Sie verwachsen mit dem Gelkissen und dienen als Halteseile. Die Idee: Durch Bewegung des Kopfes und Beschleunigung der Maculae verändern die schwimmenden Otoconien ihre Lage. Wie Schiffe an der Kaimauer am Tampen, so ziehen die Otoconien an den Fibrillen. Dieser Zug setzt sich über die Gelkissen der Maculae bis zu den Sinneshärchen fort, die über Nervenbahnen die Beschleunigungsinformation an das Gehirn weiterleiten.

BESCHÄDIGTE OTOCONIEN KÖNNEN SCHWINDELIG MACHEN

Möglicherweise kann Kniep inzwischen sogar das Versagen von Otoconien erklären. Bekannt ist, dass ältere Menschen häufiger unter Schwindel leiden, oder auch, dass sich gelöste Otoconien in den Labyrinthgängen verirren. Ein möglicher Grund: Die Otoconien lösen sich zum Teil aus der Fibrillenverankerung und leiten damit die Beschleunigungsinformation nicht korrekt weiter. Damit stellen sie den Beschleunigungssensor im Innenohr

völlig auf den Kopf. Knieps Detailbeobachtungen liefern eine plausible Erklärung für den Fibrillenabriss.

Um die innere Struktur der Otoconien zu analysieren, hat er das Calcitgerüst schrittweise chemisch aufgelöst. Es zeigte sich, dass zunächst der poröse Bauch verschwindet. Dann werden nach und nach tiefe Löcher in die glatten Rhomboidflächen gefressen. Das gab Kniep einen Hinweis, warum die Otoconien im Alter den Halt verlieren: Löst sich der Calcit, so zerbröseln auch die Haltepunkte der Fibrillen. Je stärker das Körnchen degeneriert, umso haltloser sitzt es im Fibrillennetzwerk. Experten, denen Kniep seine Hypothese vorzutrug, fanden die Idee einleuchtend. „Dass sich die Untersuchungen an den biomimetischen Otoconien tatsächlich auf die Natur übertragen ließen, daran zweifelten sie allerdings“, sagt Kniep.

Der nächste Schritt lag auf der Hand: der Vergleich mit biogenen, mit menschlichen Otoconien. Kniep fragte bei HNO-Kollegen vor Ort nach. Und die lieferten ihm Ohrenstaub älterer Patienten. Er landete einen Treffer. Die be-

» Vielleicht lässt sich in Zukunft durch Gabe der nötigen Inhaltsstoffe auch der Otoconien-Calcit regenerieren. Doch davon sind wir heute noch weit entfernt.

tagten Otoconien aus dem Ohr sahen genauso aus wie die decalcifizierten Kunst-Otoconien. Beide hatten ihren Bauch verloren, und die Rhomboeder waren von tiefen Furchen durchzogen. Kniep kann sich vorstellen, dass sich mit zunehmendem Alter der pH-Wert der Endolymphe in den Maculae ändern kann. Der Degenerationsprozess beginnt, und die Fibrillen reißen ab.

SCHLANKERE KÖRNCHEN DURCH ZUGABE VON ZUCKER

Einen Reparaturkitt für Zahnschmelz hat Kniep zusammen mit seinen Mitarbeitern bereits entwickelt. Nicht auszuschließen, dass ihm in Zukunft gemeinsam mit den HNO-Experten Ähnliches für die Otoconien gelingen könnte. „Vielleicht lässt sich in Zukunft durch Gabe der nötigen Inhaltsstoffe auch der Otoconien-Calcit regenerieren. Doch davon sind wir heute noch weit entfernt“, sagt Kniep.

Ein Grund für sein Zögern ist, dass die Otoconien aus dem U-Rohr den realen Gehörkörnchen eben doch noch nicht völlig gleichen. Sie sind ein wenig gedrungener. Doch auch das scheint Kniep langsam in den Griff zu bekommen. „Schon länger vermutet man, dass in dem biogenen Calcit auch Zuckerkomponenten eingebaut sind. Also haben wir das im Labor nachgespielt.“ Tatsächlich: Füllen die Forscher neben Gelatine auch Agarose oder andere Zucker ins U-Rohr, wachsen im Gel schlankere Otoconien heran. Derzeit probieren Knieps Mitarbeiter diverse Rezepte, in denen sie verschiedene Moleküle einsetzen und die Konzentrationen der Inhaltsstoffe verändern.

Wie echt die falschen Otoconien sind, ist eine der Fragen, die Kniep momentan beschäftigen. „Schon ziemlich nah dran“, dürfte die Antwort lauten. Denn beide teilen eine zweite erstaunliche Eigenschaft. Gewöhnliche Kristalle wie etwa Quarz in der unbelebten Natur wachsen, indem sich Atome zu einem regelmäßigen Atomgitter zusammenlagern, das immer größer wird. Experten nennen derartige Kristalle Einkristalle. Bestrahlt man solche Kristalle mit Röntgenlicht, lässt sich aus dem Beugungsmuster herauslesen, ob sie tatsächlich nur aus einem einzigen Kristall bestehen.

Im Röntgenlicht präsentieren sich echte Otoconien auch als Einkristalle. Nur, im klassischen Sinne sind sie das nicht! Immerhin werden sie von Molekülfasern durchzogen und bestehen aus vielen einzelnen, nur wenige Nanometer großen Calcitblöckchen. Von einem Einkristall kann also keine Rede sein. Dennoch zeigt sich im Röntgenlicht eindeutig das Beugungsbild des Einkristalls. „Lebende Organismen sind auf faszinierende Weise in der Lage, nanostrukturierte Composite zu bilden, die sich wie Einkristalle verhalten“, sagt Kniep. Tatsächlich schafft das nicht nur die Natur: Denn die Otoconien aus Knieps U-Rohr verhalten sich im Röntgenlicht exakt genauso.

Kniep ist wahrlich nah dran am natürlichen Vorbild. Derzeit versucht er herauszufinden, wie das Wachstum der wunderschön symmetrischen Otoconien beginnt. Er sucht nach der Keimzelle der Rhomboeder. Kniep kooperiert inzwischen mit der Klinik und Poliklinik für Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde in Dresden. Ihr Direktor Thomas Zahnert hofft,

dass sich das Wissen um das Otoconien-Wachstum irgendwann tatsächlich für Therapien einsetzen lässt. „Noch sind wir weit davon entfernt, aber es ist denkbar, dass biomimetische Otoconien künftig als eine Art Organersatz dienen könnten.“ Bis dahin müssen die Forscher die Otoconien-Synthese und die Funktion der Körnchen noch besser verstehen. Doch wer weiß, vielleicht liegt der Sprung in die Wirklichkeit gar nicht mehr in so weiter Ferne. ◀

GLOSSAR

Rhomboeder

Ein Polyeder, das ausschließlich von Rauten begrenzt wird. Gegenüberliegende Seiten und Winkel sind in Rauten gleich lang und gleich groß.

Macula-Organ

Strukturen im Innenohr, die die lineare Beschleunigung im Raum messen. Der Sacculus erfasst die vertikale Beschleunigung, der Utriculus die horizontale.

Kollagen

Ein sehr zugfestes und kaum dehnbare tierisches Protein, das den organischen Hauptbestandteil von Knochen, Zähnen und Knorpeln bildet. Bezogen auf das Gewicht macht es ein Drittel des gesamten Eiweißes im menschlichen Körper aus.

Apatit

Ein Mineral, das aus Calcium und Phosphat und einem weiteren Bestandteil (Fluorid, Chlorid oder Hydroxid) besteht.

Calcit

Eine Kristallform von Calciumcarbonat (Kalk).



Bodenforscher auf dem Weg zur Arbeit: Gruppenleiter Markus Reichstein (im orangefarbenen Pullover) und seine Kollegen vom Max-Planck-Institut für Biogeochemie wollen Bodenproben entnehmen, um sie später im Labor zu untersuchen.

Klima, das im Boden steckt

Das Erdreich haben Klimamodelle bislang ziemlich vernachlässigt. Das soll sich ändern. Wissenschaftler um **Markus Reichstein** am **Max-Planck-Institut für Biogeochemie** in Jena untersuchen die klimarelevanten Prozesse im Untergrund und entwickeln Modelle, um sie zu beschreiben.

TEXT **CORNELIA REICHERT**

Die Erde bildet einen lebenden Superorganismus, der sich selbst reguliert. Als der britische Geochemiker James Lovelock in den 1970er-Jahren diese Idee in seiner Gaia-Theorie vorstellte, erntete er viel Lob und viel Kritik: Theologen, Esoteriker und Sinn-suchende begrüßten den neuen, ganzheitlichen Blick. Die Wissenschaft indes lehnte die These ab und bemängelte vor allem Lovelocks laxen Umgang mit dem Begriff Leben, immerhin kann sich die Erde nicht fortpflanzen. Doch spätestens seit die Klimaforschung intensiviert wurde, ist klar: Hier hilft nur systemisches Denken – die Grundidee von der Erde als Gesamtsystem.

Polareis, Meer, Atmosphäre und die Wälder – sie sind die bekanntesten Protagonisten des Weltklimas. Darin stimmen Forscher überein. Was aber macht der Boden? Der blieb in den üblichen Modellrechnungen, wie sie auch dem aktuellen Weltklimabericht von 2007 zugrunde liegen, weitgehend unberücksichtigt. Wie reagieren die biogeochemischen Prozesse im Untergrund darauf, dass sich das Klima verändert? Und wie beeinflussen die Abläufe im Untergrund umgekehrt das Klima?

„Der Boden als Faktor im Erdsystem ist ein echtes Stiefkind der Forschung. Diese Lücke wollen wir schließen helfen“, sagt Markus Reichstein, der am Max-Planck-Institut für Biogeochemie in Jena eine Arbeitsgruppe leitet: „Ich glaube, wir haben den Boden als Klimafaktor bislang stark unterschätzt.“

„EIN AUFGEHENDER STERN IN DER ÖKOLOGIE“

Seit seinem Studium dreht sich bei Reichstein alles um das, was unter seinen Füßen geschieht. Reichstein hat an der Universität Münster Landschaftsökologie studiert und für sein Diplom den Humus auf Bergböden im schweizerischen Davos untersucht. Heute will er die Prozesse im Untergrund auch über theoretische Ansätze verstehen. Seit 2006 entwickelt der Nachwuchsforscher zusammen mit seinem Team mögliche Modelle für die Rolle des Erdreichs im Klimasystem.

Die Arbeit wird weltweit hoch gehandelt. So etwa veröffentlicht die Zeitschrift *SCIENCE WATCH* des Instituts für Wissenschaftsinformation (ISI) in Philadelphia regelmäßig Statistiken, wer im Wissenschafts-Wettkampf vorn



liegt. Auf ihrem Internetportal nennt sie Reichstein einen „aufgehenden Stern in den Feldern der Umweltwissenschaften und Ökologie“.

DIE WERKZEUGE: MATHEMATIK UND STECHZYLINDER

„Die Kunst der Modellierung besteht darin, die reale Welt zu abstrahieren und eine Verbindung zur Welt der Formeln zu schaffen“, sagt Markus Reichstein. Mathematik sei dabei ein wichtiges Werkzeug, aber nicht mehr: „Ich erinnere mich zum Beispiel an einen Mathematiker, der gleichzeitig mit mir eine Doktorarbeit angefangen hat. Er war exzellent in seinem Fach, hatte aber enorme Schwierigkeiten, die reale Welt mit der Mathematik zusammenzubringen.“ Dazu müsse man zwischen den Wissenschaften stehen. Reichstein und seine Kollegen tun genau das: Wie gut oder wie schlecht ihre theoretischen Hypothesen die Wirk-

lichkeit beschreiben, testen sie mit Versuchen im Freiland und im Labor.

„Um überhaupt überlegen zu können, wie sich der Boden formelhaft beschreiben lässt, muss man erst einmal verstehen, was der Boden eigentlich ist und was alles in ihm abläuft“, sagt Reichstein. Der Boden bildet die Zwischenwelt zwischen der Oberfläche der steinigen Erdkruste auf der einen und der Pflanzendecke sowie der Luft auf der anderen Seite.

Der Boden ist aus verschiedenen Schichten aufgebaut, fachsprachlich Horizonte genannt: Unter der obersten Auflageschicht befindet sich der Humushorizont, eine Lage aus totem, verwestem Pflanzenmaterial. Darunter liegt die Verwitterungsschicht. In ihr werden die Minerale des Erdkrustengesteins ab- und umgebaut. Jede einzelne Schicht ist enorm belebt: „Egal wo man gräbt: In einer Handvoll Boden tummeln sich Milliarden verschiedener Mikroorganismen“, so Reichstein.

Die Scharen an Bakterien, Einzellern, Pilzen, Algen, Würmern und Insekten leben in verschiedenen Tiefen und sehr unterschiedlich: Einige gehen Symbiosen mit Pflanzen ein. Die geben über ihre Wurzeln Kohlenhydrate ab, von denen die Mikroorganismen leben, die dafür dann etwa Nährstoffe zurückgeben – die klassische Win-Win-Situation: Alle nehmen, alle geben, allen geht es gut. Andere der winzigen Organismen leben wiederum vom Pflanzentod. Bakterien und Einzeller etwa gewinnen ihre Energie, indem sie abgestorbenes Grün zerkleinern, verdauen und den Kohlenstoff daraus veratmen.

Geschätzte 60 bis 80 Gigatonnen Kohlenstoff in Form von Kohlendioxid strömen so jährlich in die Luft, dazu noch die ungleich stärkeren Treibhausgase Methan und Lachgas. Der Mensch pustet in derselben Zeit acht Gigatonnen Kohlenstoff als Kohlendioxid in die Luft, indem er fossile Brennstoffe verbrennt. „Allein diese Zahlen verdeutli-



links	Zur Probenentnahme treibt der Techniker Marco Pöhlmann eine Rammkernsonde in den Waldboden. Markus Reichstein, Susan Trumbore, Marion Schrupf und Enrico Weber (von links) warten gespannt auf den Bohrkern.
oben links	Der Stechzylinder liefert eine Bodenprobe aus mehreren Schichten. Im Institut werden die Wissenschaftler später die Zusammensetzung des Erdreichs aus verschiedenen Tiefen untersuchen.
oben rechts	Leben im Untergrund: Jede Probe enthält zahllose Lebewesen, die Pflanzenmaterial umsetzen, darunter auch Regenwürmer. Ihr Kot – die sogenannte Regenwurmlösung – spielt als Dünger eine wichtige Rolle.

chen, wie relevant der Boden womöglich für den Kohlenstoffkreislauf und damit für das Klimasystem ist“, so Reichstein.

KLIMAERWÄRMUNG HEIZT AUCH DEM ERDREICH EIN

Pflanzen nehmen das Treibhausgas über die Fotosynthese wieder auf. Entspricht die aufgenommene Menge derjenigen, die durch die Bodenatmung freigesetzt wird, befindet sich das System im Gleichgewicht. Die Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre verändert sich nicht. Einige Waldgebiete nehmen sogar mehr von dem Gas auf, als sie freisetzen. Insgesamt speichert der Boden mehr als 3000 Gigatonnen Kohlenstoff, über viermal so viel wie die Atmosphäre.

Doch künftig könnten Böden mehr von dem klimaschädlichen Gas abgeben, als sie aufnehmen. Denn die Erderwärmung heizt auch dem Boden ein,

und der Stoffwechsel der Organismen legt an Tempo zu. In kürzerer Zeit bauen sie mehr Pflanzenmaterial ab und atmen mehr Kohlendioxid aus, sodass sich die Atmosphäre weiter erwärmt. Der Treibhauseffekt könnte sich auf diese Weise selbst verstärken.

Ob es so kommt oder ob sich das System womöglich selbst puffert, ist strittig, und was konkrete Zahlen betrifft, sind die Vorhersagen bestenfalls ungenau. „Die meisten Modelle sagen, Ökosysteme nehmen erst einmal weiter Kohlenstoff auf“, erläutert Reichstein: „Nach anderen Prognosen könnte das System wegen der Rückkopplung aber auch ins Gegenteil umschlagen.“ Dann würde sich der Boden in der Nettobilanz in der Tat von einer Kohlendioxid-senke in eine Quelle verwandeln.

Ein internationales Wissenschaftlerteam um den französischen Umweltforscher Pierre Friedlingstein hat elf verschiedene Kohlenstoffkreislauf-Klima-Modelle testweise durchgerech-

net und verglichen. Den größten Optimismus erlaubt derzeit die Vorhersage des Lawrence Livermore National Laboratory in Kalifornien: Hiernach bindet der Boden weiter Kohlendioxid, vielleicht sogar mehr als momentan. Der Boden verhält sich morgen wie heute, besagt dagegen ein Modell der Universität Maryland.

Die schwärzeste Prognose machen die Ergebnisse aus einem Modell des britischen Hadley Centre: Hiernach könnte der Boden im Jahr 2100 womöglich netto mehr als drei Gigatonnen Kohlenstoff jährlich abgeben. „Das ist vermutlich stark überzeichnet, aber der Boden könnte durchaus zu einem Klima-Anheizer werden“, kommentiert Max-Planck-Forscher Reichstein.

Welches Szenario tatsächlich eintritt, hängt von einem winzigen Faktor in einer Faustformel ab, der sogenannten RGT-Regel. Sie beschreibt das Zusammenspiel zwischen der Reaktions-Geschwindigkeit des Bodens in



Abhängigkeit von der Temperatur und damit, welche Klimawirkung von den Bodenorganismen ausgeht: Über den Daumen gepeilt verdoppelt sich die Bodenaktivität, wenn die Temperatur um zehn Grad steigt – so lautet die Regel; einfaches Schulbuchwissen, das die Wirklichkeit einigermaßen gut zu beschreiben schien.

Das galt auch in der Wissenschaft, zumindest bislang. „Inzwischen wissen wir, dass dieser Faktor über die Entwicklung entscheidet“, so Reichstein: „Deswegen müssen wir unbedingt herausfinden, wie hoch dieser Faktor genau ist und ob er sich verändern kann.“ Verdoppelt sich die Bodenaktivität oder erhöht sie sich vielleicht nur um das Anderthalbfache oder verdreifacht sie sich womöglich sogar? Von dieser Zahl hängt es ab, ob der Boden eine Kohlendioxidsenke bleibt, ein eher neutraler Faktor wird oder den Treibhauseffekt noch verstärkt.

Die Unsicherheit, wie groß der Faktor der RGT-Regel ist, rührt unter anderem von einer Detailfrage zum Abbau der Biomasse im Boden. Das Prinzip ist unstrittig: Mikroben verstoffwechseln totes Material, sie atmen

Kohlendioxid aus, der Boden gasst aus. Weitere Pflanzen sterben ab, die Mikroben machen sich über die frische Biomasse her und bauen zugleich weiter älteres, schon vorverdautes Humusmaterial ab. Uneinig sind sich die Bodenkundler in der Frage, wie schnell und in welchem Umfang die Bodenorganismen jeweils das frische und das alte Material abbauen.

FRISCHE BIOMASSE MACHT APPETIT AUF ALTE KOST

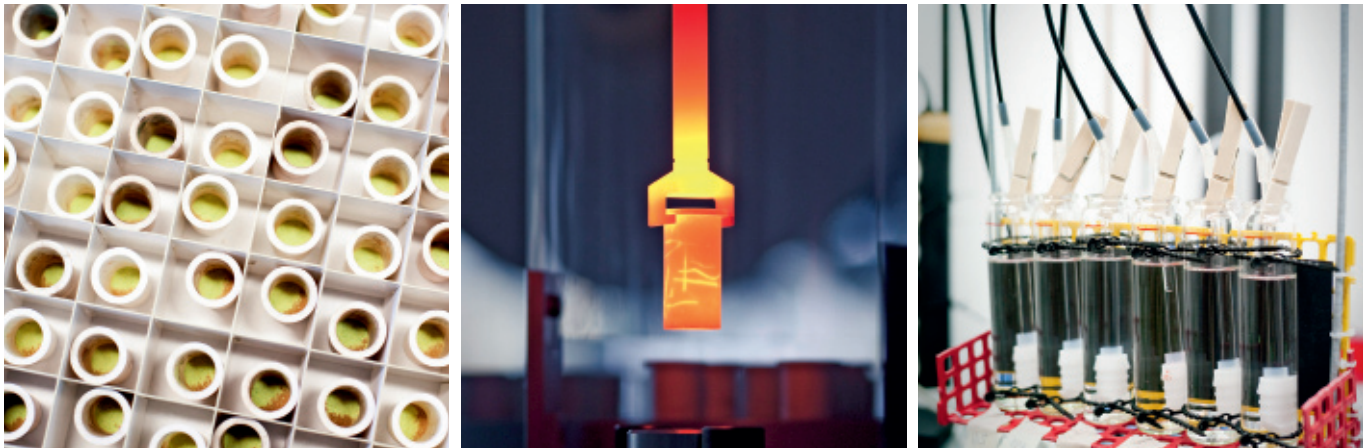
Was passiert, wenn die Temperatur zunimmt, beschreiben klassische Modelle so: Mit der Erwärmung vertilgen Bodenbewohner das frische Material schneller, ihr Appetit auf das Altmaterial bleibt dagegen gleich. Damit würde sich die Bodenatmung zwar verstärken, unterm Strich bliebe der Boden jedoch eine Kohlendioxidsenke. „Genau das bezweifeln wir. Denn Bodenmikroben führen ein intensives Eigenleben. Wie sie sich verhalten, ist vielleicht gar nicht so einfach berechenbar wie gedacht“, sagt Markus Reichstein.

Der Forscher und seine Kollegen gehen davon aus, dass der *Priming*-Effekt

auftritt: „Immer wenn den Mikroben neue, frische Biomasse zur Verfügung steht, steigert das auch ihren Appetit aufs alte Humusmaterial.“ Der Abbauvorgang beschleunigt sich, der Boden atmet mehr Kohlendioxid aus. Außerdem gedeihen die Mikroben prächtiger und breiten sich aus. „Das System verstärkt sich, je wärmer der Boden wird“, erklärt Reichstein. Frische Biomasse wirkt quasi wie ein Aperitif, der auch den Appetit auf älteres Futter anregt.

Manche Bodenprozesse arbeiten dem *Priming*-Effekt jedoch entgegen: Chemische Wechselwirkungen zwischen Mineralen etwa halten Kohlenstoff im Boden fest. Zum Beispiel lagern Eisen- oder Aluminiumhydroxide auf ihrer Oberfläche häufig Kohlenstoff an, von wo er sich vorerst nicht wieder löst.

Um computertechnisch so einfach wie möglich und gleichzeitig ausreichend genau zu berechnen, wie diese Prozesse zusammenspielen, haben sich die Forscher eine Reihe möglicher mathematischer Formelsätze überlegt. Welcher davon am besten passt, wollen sie mit Labor- und Freilandexperimenten herausfinden. Jetzt heißt es praktisch ran ans Erdreich.



- oben | Um ihren Gehalt an Kohlenstoff und Stickstoff zu messen, werden die Bodenproben gemahlen und in Keramiktiegel eingewogen (links). Die gelbe Farbe kommt von Wolframoxid, das als Katalysator dient. Bei der Bestimmung des Gesamt-Kohlenstoffgehalts hilft ein automatischer Probengeber (Mitte). Dazu werden die Tiegel mit den Proben auf 1100 Grad Celsius erhitzt. In automatisierten Inkubationsexperimenten unter kontrollierten Temperatur- und Feuchtebedingungen untersuchen die Forscher die Umsetzungsprozesse im Boden (rechts).
- links | Im Labor fängt die Arbeit erst richtig an: Markus Reichstein präsentiert Dutzende Bodenproben, die vor der Analyse zunächst getrocknet werden – aus Platzmangel hier in einem Gewächshaus.

Reichstein und seine Kollegen konnten hierzu ein Millionenprojekt des Europäischen Forschungsrats (European Research Council, ERC) an ihr Institut holen. Im Rahmen von QUASOM (*Quantifying and modelling pathways of soil organic matter as affected by abiotic factors, microbial dynamics, and transport processes*) wollen sie nun Daten aus neuen Geländeexperimenten mit Daten aus anderen europäischen Forschungsprojekten in einem Bodensimulationsmodell zusammenzuführen.

Erfahrung mit Freilanddaten bringt Marion Schrumpf mit ins Team. Sie hat bereits im Carbo-Europe-Projekt (*Assessment of the European Terrestrial Carbon Balance*) Felddaten gesammelt. Das Projekt galt der Frage, wie sich auf dem ganzen Kontinent die Aktivität im Boden über die Zeit verändert und wie man Wälder und Ackerflächen so bewirtschaftet, dass ihre Böden möglichst viel Kohlendioxid binden. Unter der Leitung des inzwischen emeritierten Jenaer Max-Planck-Gründungsleiters Ernst-Detlef Schulze beteiligten sich daran 61 Forschungsinstitute aus 17 europäischen Ländern.

Messtechnisch haben die Forscher nicht selten Neuland beschritten. „Eine umfassende Bodeninventur wurde in der Geschichte einfach noch nicht gemacht“, sagt Marion Schrumpf. Extrem rar sind etwa Daten von Waldböden. „Die Forstwirtschaft hat sich zwar für den Baumbestand interessiert, aber nicht für den Boden, auf dem er wächst“, so die Forscherin. Die wenigen vorhandenen Daten stammen aus der Landwirtschaft. Bauern und Agrarwissenschaftler beobachten seit mehr als hundert Jahren, wie Ackerböden auf äußere physikalische und chemische Einflüsse reagieren.

Oft aber sind diese Daten alles andere als vollständig. „Außerdem hat man bislang aus einer ganz anderen Sichtweise gearbeitet“, sagt Schrumpf. Der Landwirtschaft geht es schließlich vor allem um Erkenntnisse über die Bodenfruchtbarkeit. Die Wissenschaftler von Carbo-Europe und QUASOM nähern sich dem Boden aus der Perspektive der Klimaforschung, denn viel Kohlenstoff im Boden steigert nicht nur die Fruchtbarkeit und Ernte, sondern bedeutet auch, dass der Luft Kohlenstoff entzogen wird.

Marion Schrumpf hat im Rahmen von Carbo-Europe Bohrkern von zwölf Standorten bearbeitet. Sie stammen von Orten, an denen Türme für Atmosphärenmessungen stehen. „So sind wir nicht nur gut mit Boden-, sondern auch mit anderen Umweltwerten versorgt“, sagt die Forscherin. Insgesamt hat sie mehr als 9000 Proben untersucht – ein enormer Aufwand.

NUR IN DER ERDE GRABEN REICHT LÄNGST NICHT AUS

Das fängt bei der Probennahme an: „Wäre die Welt ein Sandhaufen, hätten wir es leicht“, sagt Schrumpf: „Aber einfach rausgehen, graben und einen Haufen Erde mitbringen, wie man sich das vielleicht vorstellt, funktioniert leider nicht.“ Daher treibt sie zum Beispiel einen Stechzylinder in den Untergrund. „Das kann durchaus anstrengend sein“, sagt die Forscherin. Denn viele Böden seien knüppelhart. Und je tiefer sie ins Erdreich vordringt, desto fester werden sie.

„Außerdem kann man eine Bodenprobe nicht einfach in Tüten stecken“, so Schrumpf. „Für quantitative Unter-



Datenauswertung am Computer: Markus Reichstein analysiert die CO₂-Flüsse aus dem Boden in den Inkubationsgefäßen. Das Fenster erlaubt einen Blick in die Klimakammer, wo Stefany Thiessen, Doktorandin im QUASOM-Projekt, eines der 80 Gefäße kontrolliert.

suchungen muss man ein genau definiertes Volumen Boden aus der Erde entfernen und wissen, aus welcher Tiefe die Probe stammt.“ Und da es den Wissenschaftlern in dem Projekt darum geht, wie sich der Boden mit der Zeit verändert, müssen sie nach einigen Jahren die gleichen Stellen wieder beproben.

PROZESSE DER UNTERWELT IM LABOR

Im Rahmen von Carbo-Europe ist das inzwischen abgeschlossen, doch im Labor geht die Arbeit weiter. Dort sortiert Schrupf die Wurzeln aus der Probe, trocknet sie, siebt und zermahlt sie und misst dann ihren Kohlenstoffgehalt: „Das sind wenigstens 45 Minuten pro Probe, die Trockenzeit nicht mitgerechnet.“ Einige der Standorte sollen in Zukunft regelmäßig untersucht werden – idealerweise über Jahrzehnte. Dafür werden Schrupf und ihre Kollegen die ganze Prozedur wiederholen.

Auch für die QUASOM-Untersuchungen werden die Bodenforscher noch häufig zum Probensammeln ausrücken. Wie schon bei Carbo-Europe werden die Forscher die Bodenproben gezielt für sich arbeiten lassen: im Labor unter kontrollierten Bedingungen. „Wir können alles einzeln steuern – von der Menge der Frischmaterialzugabe über die Temperatur bis zur Feuchte und zum Wind – und schauen, wie ein bestimmter Boden unter bestimmten Bedingungen reagiert“, sagt Gruppenleiter Markus Reichstein. So kommen die Wissenschaftler den einzelnen Prozessen in der Unterwelt auf die Spur und finden heraus, was wie unter ganz bestimmten Bedingungen abläuft.

Doch Laborversuche leiden auch unter Einschränkungen: Sie liefern Daten über ein künstliches Teilsystem, die Wirklichkeit draußen könnte anders aussehen. Deswegen wollen die Forscher zusätzliche Tests im Freiland machen, die solche Zweifel ausräumen.

Zwar sind diese Daten ungenauer, weil sie wegen Wind und Wetter stärker variieren. Zusammen aber bilden Freiland- und Laborwerte eine gute Wissensbasis.

Dazu kommen Werte aus der Luft, die im Rahmen von Fluxnet gewonnen werden, einem weltweiten Netzwerk von Kohlendioxid- und Wasserdampfmessungen. In der Luftschicht über Ökosystemen wird jeweils zehn- bis zwanzigmal pro Sekunde die Kohlendioxid- und Wasserkonzentration bestimmt und gleichzeitig die vertikale Windgeschwindigkeit. Daraus ermitteln Reichstein und sein Team, wie viel der beiden Gase das Bodensystem und die Luft austauschen. Der große Vorteil ist, dass diese Messart das Ökosystem selbst nicht beeinflusst oder verändert. Deshalb können die Messungen bedenkenlos über viele Jahre laufen. Satellitendaten helfen, die Zusammenhänge auf größere Gebiete zu übertragen, sogar auf ganze Kontinente.

Sämtliche Daten landen in den Rechnern der Teaminformatiker Thomas Wutzler und Christian Beer. Wutzler wertet sie statistisch aus und speist sie in die vorher formulierten Modelle ein. Alle sind theoretisch in sich schlüssig und somit zunächst auch alle gleich plausibel. Der Formelsatz, der dann mit den neuen Daten die Wirklichkeit am besten abbildet, wird am Ende in die weltweite Klimasimulation eingebaut. Dafür sorgt Beer. Seine großskaligen Simulationen vereinigen die örtlichen, regionalen sowie landes- und kontinentalweiten Studien zu einem ganzheitlichen Bild.

Beim Versuch, die Rolle des Bodens im Treibhaus Erde aufzuklären, bekommt Reichsteins Team jetzt auch noch prominente wissenschaftliche Unterstützung: Am Max-Planck-Insti-

tut für Biogeochemie trat im September die Amerikanerin Susan Trumbore die Nachfolge von Gründungsdirektor Ernst-Detlef Schulze an. In ihrer vorherigen Forschungsarbeit in Amerika und der Schweiz hat sich auch Trumbore unter anderem damit befasst, wie das Potenzial von Böden als künftige Quelle von Kohlendioxid berechnet werden kann. „Wir wollen eng zusammenarbeiten“, sagt Reichstein.

Und es gibt noch viel zu tun. Denn für belastbare Bodenvorhersagen – womöglich für die ganze Welt und gleich für Jahrhunderte – ist es noch viel zu früh, bis dahin werden noch Jahre vergehen. Reichstein: „Der Boden birgt einige der letzten Rätsel im Erdsystem. Für bessere und belastbarere Klimaprognosen müssen wir diese Fragen lösen.“ ◀

GLOSSAR

Priming-Effekt

Bestimmte Stoffe, etwa frische Biomasse, können die generelle Aktivität von Mikroorganismen im Boden steigern.

Carbo-Europe

Forscher möchten in diesem Projekt den terrestrischen Kohlenstoffhaushalt in Europa verstehen und quantifizieren.

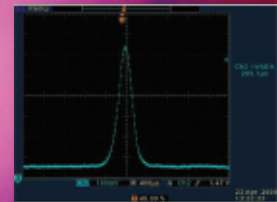
Fluxnet

Mit Messtürmen wird weltweit der Austausch von Kohlendioxid, Wasserdampf und Energie zwischen Boden und Atmosphäre bestimmt.

QUASOM

Verfolgt das Ziel, die Wechselwirkungen zwischen biologischen und physikochemischen Prozessen im Boden besser zu verstehen.

Unison™ Verstärker für den Terawatt- und kHz-Bereich



Autokorrelation des Ausgangsstrahls des Unison Verstärkers mit einer Pulsbreite von weniger als 40 fs.

Ein Terawatt-Laserstrahl wird auf einen Gasstrom fokussiert.

Ein System. Duale Experimente. Mehr Ergebnisse.

Newport Spectra-Physics stellt das Ultrakurzpuls-Verstärkersystem **Unison™** vor. Das System ist so ausgelegt, dass es Femtosekunden-Pulse sowohl im Terawatt-Bereich mit 10 Hz als auch im mJ-Bereich mit kHz erzeugen kann. Durch die große Bandbreite der Pulsintensitäten eignet sich der Unison Verstärker ideal für verschiedene Anwendungen, wie hochenergetische VUV-Spektroskopie, Multiphoton- und Above-Threshold-Ionisierung und für die Erzeugung von hohen Harmonischen sowie für Standardexperimente der zeitaufgelösten Spektroskopie, z.B. CARS, Pump-Probe und Terahertzzeugung.

Für weitere Details besuchen Sie bitte unsere Webpage: www.newport.com/unison

Newport Spectra-Physics GmbH
 Guerickeweg 7 – 64291 Darmstadt
 Telefon: +49 (0) 61 51 / 708 – 0 • Telefax: +49 (0) 61 51 / 708 – 217 oder – 950
 E-Mail: germany@newport.com



© 2009 Newport Corporation.



51

Machen Boni Beine?

Manager-Boni, die falsche Anreize setzen, gelten als ein Grund für die jüngste Finanzkrise. Wie sie sich auf den Erfolg von Unternehmen auswirken, untersucht **Carsten Burhop** am Bonner **Max-Planck-Institut zur Erforschung von Gemeinschaftsgütern**, und zwar anhand historischer Beispiele. Denn Belohnungen für Erfolge sollten Führungskräfte, aber auch Erfinder, bereits am Ende des 19. Jahrhunderts motivieren.

TEXT **BIRGIT FENZEL**

Gier nach Boni beschäftigt erstmals Justiz.“ So betitelte eine überregionale Tageszeitung aus dem Süden der Republik unlängst den Aufmacher auf ihrer Wirtschaftsseite. In der Sache ging es darum, dass Bankmanager wegen fragwürdiger Bonuspraktiken vor Gericht gestellt werden könnten. Denn zwei Aktienhändler der Westdeutschen Landesbank (WestLB) sollen risikoreiche Geschäfte verschleiern haben, um ihre Boni nicht zu gefährden, wofür ihnen jetzt der Prozess gemacht werden soll. Es wäre hierzu das erste Mal, dass Bankmanager wegen fragwürdiger Bonuspraktiken vor Gericht gestellt werden.

Diese Nachricht markierte den vorläufigen Höhepunkt in einer Debatte über das Belohnungssystem für Spitzenkräfte in der Wirtschaft im Allgemeinen und der Banker im Besonderen. Hatten sich doch trotz Rezession und Wirtschaftskrise einige Führungskräfte ansehnliche Extrazahlungen zum Jahresgehalt genehmigt. Dass sich

in Zeiten der Finanzkrise ausgerechnet jene in die Taschen wirtschaften, die weithin als die eigentlichen Verursacher des ökonomischen Einbruchs gelten, empörte viele Menschen weltweit.

ZUFALLESENTDECKUNG WECKTE DIE NEUGIER

Am Max-Planck-Institut zur Erforschung von Gemeinschaftsgütern in Bonn sitzt Carsten Burhop in seinem Büro und wirft einen Blick in die Zeitung. Interessiert verfolgt der 35-jährige Ökonom die Berichte über Managergehälter und Boni, die momentan auch immer wieder in den Wirtschaftsteilen auftauchen. Dabei beschäftigt ihn dieses Thema nicht erst seit der Finanzkrise. „Ich bin während der Arbeit an meiner Promotion im Archiv zufällig auf Arbeitsverträge von Bankvorständen gestoßen, das war im Jahr 2001. Da es damals bereits eine Diskussion über das Thema gab – Stichwort: Enron-Pleite – habe ich das seitdem etwas weiterverfolgt“, erzählt er.

Das „etwas weiterverfolgt“ sah in der Praxis so aus, dass sich Burhop gemeinsam mit seinem Bonner Kollegen Thorsten Lübbers zur Recherche in die Archive von Bibliotheken, Banken und großen Unternehmen in der ganzen Republik begab. Wie viele Stunden er damit verbracht hat, in den staubigen Ordnern alte Börsenberichte, Bilanzen, Patentschriften und Inhaltsverträge zu studieren, kann er nicht genau sagen – wohl aber, dass er dabei auf die eine oder andere Tatsache gestoßen ist, die sicher auch für die aktuelle Diskussion über Sinn und Unsinn von Bonifikationen interessant sein dürfte. Mit seinem Projekt will er herausfinden, ob sich Bonifikationen oder Tantiemen zur Disziplinierung und Motivation von Managern eignen.

Als Wirtschaftswissenschaftler interessierte sich Burhop dabei speziell dafür, wie die pekuniäre Extraausstattung auf ein Phänomen wirkt, das in der Ökonomie als Prinzipal-Agent-Problem bezeichnet wird. Einfach ausgedrückt handelt es sich um einen folgenreichen



Interessenskonflikt, beispielsweise zwischen Arbeitgeber und Arbeitnehmer oder zwischen Aktionär und Unternehmensvorstand. Bei nicht standardisierten Tätigkeiten, wie etwa der Führung eines Großunternehmens im Sinne der Aktionäre, kann der Prinzipal die Tätigkeiten des Agenten, also etwa der Aktionär die Arbeit des Vorstandes und ihre Auswirkungen auf Gewinne und Aktienkurse, nicht mehr nachvollziehen. Zudem wäre es für den Prinzipal viel zu aufwendig, den Agenten akribisch zu überwachen. Daher müssen die Interessen beider Seiten in eine Richtung gelenkt werden, eine Möglichkeit hierfür bietet die entsprechende Gestaltung der Arbeitsverträge.

DIE KAROTTE VOR DER NASE

„Wünscht der Aktionär steigende Aktienkurse, so sollte er das Gehalt des Unternehmensvorstandes von der Veränderung des Aktienkurses abhängig machen“, sagt Burhop. Allerdings sei auch zu berücksichtigen, dass der Nutzen von Geld nachlässt, wenn man sehr viel davon hat, das heißt, die Anreize für den Manager müssen stärker werden, je mehr er verdient. Zudem steckt dahinter die Frage, ob mit äußere

ren Anreizen solche Verhaltensweisen gesteuert werden können. Aber wenn ein Esel mit einer Karotte vor der Nase besser läuft, warum sollte dies nicht übertragbar sein?

Tatsächlich ist der Gedanke, mit Belohnungen Motivation zu schaffen, nicht neu. Das habe es schon im antiken Rom gegeben, sagt Burhop. „Schon Plinius der Jüngere schrieb in seinem Briefwechsel mit Trajan darüber, dass man durch Belohnungen von Arbeitern bessere Leistung erzielt.“ Doch hätten sich Bonifikationen im eigentlichen Sinne erst am Ende des 19. Jahrhunderts in der deutschen Wirtschaft ausgebreitet, wie Burhop anhand seines Archivstudiums herausgefunden hat.

Nicht zufällig hatte er für sein Projekt auf das späte 19. und frühe 20. Jahrhundert fokussiert. Damit wählte er einen Zeitraum, der wegen seiner rasanten technischen und institutionellen Veränderungen und seines rapiden wirtschaftlichen Wachstums aufschlussreiches Material versprach. In dieser Zeit ermöglichten die schnellere Kommunikation mit Eisenbahnen und Telegraphen die Leitung von größeren Unternehmen, die zudem nun oftmals als Aktiengesellschaft geführt wurden. Innerhalb der neuen Großunterneh-

men entstanden darüber hinaus neue Funktionen, beispielsweise im Bereich Forschung und Entwicklung. Und die ganze Erfolgsgeschichte der Gründerzeit und auch der Zeit danach hing maßgeblich von neuen technischen Entwicklungen ab, die in den Forschungseinheiten der Unternehmen ausgetüfelt wurden.

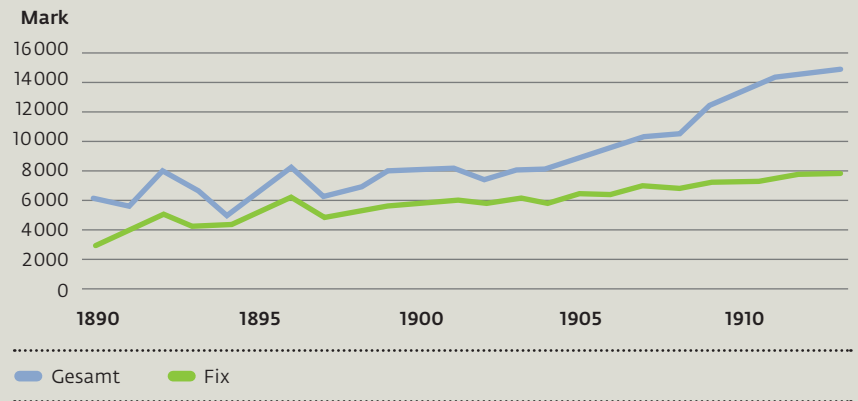
PATENTE KONFLIKTLÖSUNG

Die Patentämter sprachen die von angestellten Forschern gemachten Erfindungen aber regelmäßig den Unternehmen und nicht den eigentlichen Erfindern zu. Daher mussten die Unternehmen auch in diesem Bereich einen Konflikt zwischen ihrem Bestreben nach möglichst vielen profitablen Innovationen und den Interessen der Mitarbeiter in ihren Forschungsabteilungen lösen. „Warum sollte jemand Arbeit und Mühe in eine Erfindung stecken, von der er nicht einmal direkt profitiert?“, beschreibt Burhop das Prinzipal-Agent-Problem in seiner wilhelminischen Variante.

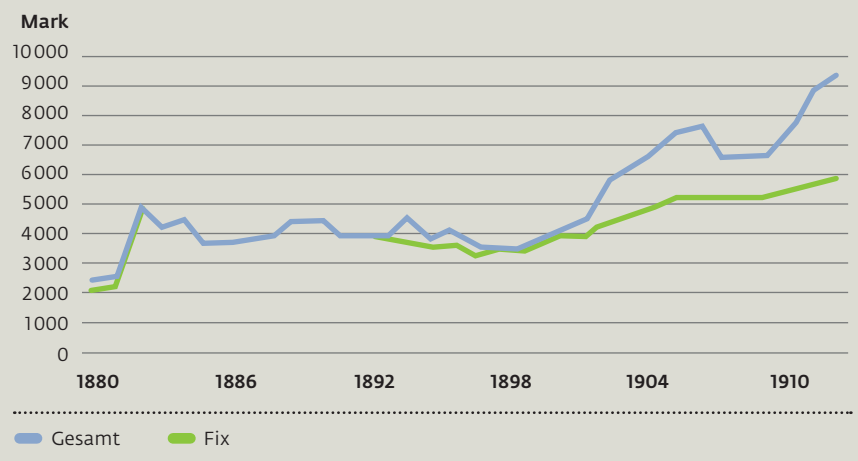
Für ihre Forschungen hatten Bayer, BASF, Hoechst, Siemens, Merck – mit hin die Spitze der deutschen Wirtschaft im Kaiserreich – den beiden

Bonner Ökonomen den Blick in die Archive ihrer Personalabteilung gewährt. Als besonders aufschlussreich erwiesen sich für Burhop und Lübbers die Arbeitsverträge von Mitarbeitern der Forschungsabteilungen von BASF, Siemens und Bayer. Denn wie sie anhand der Lohnabrechnungen rekonstruierten, bestand bis in die 90er-Jahre des 19. Jahrhunderts kaum ein Unterschied zwischen dem Festgehalt und dem tatsächlich ausgezahlten Betrag. „Von allen untersuchten Unternehmen ging zunächst nur Bayer das Prinzipal-Agent-Problem durch vorab vertraglich vereinbarte Bonuszahlungen an. Dabei errechnete sich die Höhe einer Extrazahlung zu bestimmten Bedingungen aus dem Profit, der mit einer Innovation erzielt wurde“, sagt Burhop. Vor 1890 machten Boni bei Bayer im Schnitt nicht viel mehr als ein Prozent des Gehalts aus. Erst nach der Jahrhundertwende sei der Anteil solcher variablen Bezüge der Mitarbeiter in den Forschungs- und Entwicklungsabteilungen auf 17 Prozent des gesamten Einkommens gestiegen. Dagegen hätten BASF und Siemens keine expliziten Bonussysteme verwendet, wohl aber Belohnungen für Profit versprechende Kreativleistungen gezahlt. >

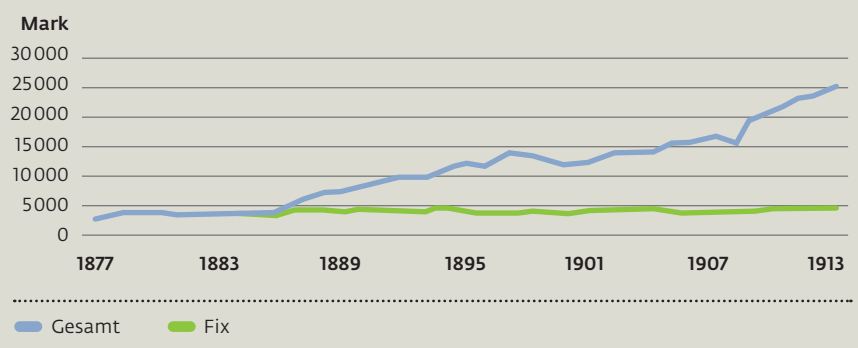
DURCHSCHNITTSEINKOMMEN VON FORSCHERN UND TECHNISCHEN ANGESTELLTEN BEI SIEMENS, 1890 BIS 1913



DURCHSCHNITTSEINKOMMEN VON CHEMIKERN BEI BAYER, 1880 BIS 1913

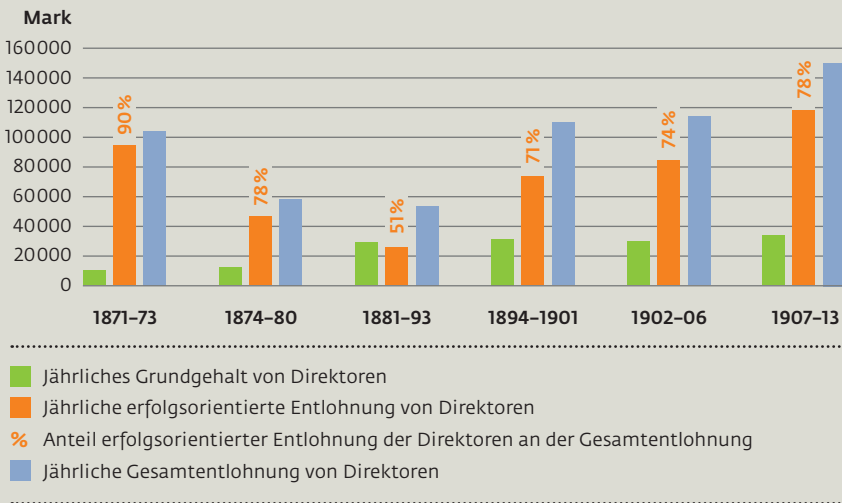


DURCHSCHNITTSEINKOMMEN VON CHEMIKERN BEI BASF, 1877 BIS 1913

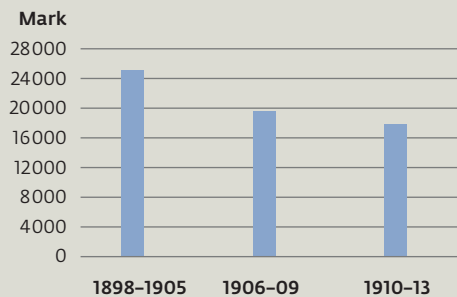


Bis in die 90er-Jahre des 19. Jahrhunderts bestand kaum ein Unterschied zwischen Festgehalt und tatsächlich ausgezahltem Betrag. Erst nach der Jahrhundertwende stieg der Anteil der Bonifikationen in den Forschungs- und Entwicklungsabteilungen deutlich an.

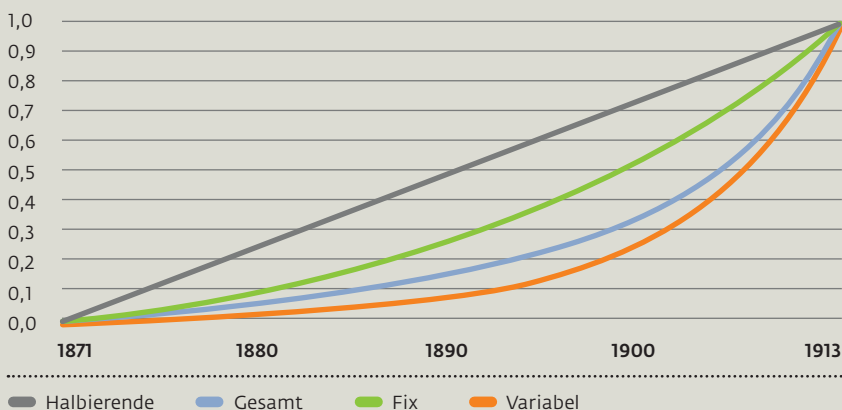
ENTLOHNUNGEN / GEHÄLTER VON DIREKTOREN



GARANTIERTES GESAMTEINKOMMEN STELLVERTRETENDER DIREKTOREN



LORENZ-KURVE DER EINKOMMEN VON BANKVORSTÄNDEN, 1871 BIS 1913



Die Lorenz-Kurve (Grafik oben) misst die Konzentration der Einkommen auf wenige Personen. Je weiter die Kurve von der Halbierenden entfernt ist, desto stärker sind die Einkommen auf wenige Personen konzentriert. Die variablen Bezüge flossen daher sehr viel stärker an wenige Manager als die fixen Bezüge. Die Anreize waren somit auf wenige Manager konzentriert.

Bei ihren Analysen der unterschiedlichen Einkünfte und der Zahl der jährlichen Patentanmeldungen aus den Unternehmen stießen die Ökonomen auf einen interessanten Zusammenhang: „Nicht nur die Höhe des Gehaltes spornt einen Mitarbeiter an, sondern die Struktur des Gehaltes“, sagt Carsten Burhop. Und die beiden Effekte laufen einander entgegen. So verringert sich die Anzahl hochwertiger Patente um 0,6 Prozent, wenn das Gesamtgehalt um ein Prozent erhöht wird. Wie die Bonner Ökonomen herausgefunden haben, richten erhöhte Bezüge in dieser Form also gerade alles andere aus, als die Leistung zu verbessern. In einer anderen spornen sie die Mitarbeiter schon an: Wenn der Anteil der Boni am Gesamtgehalt um den Faktor 1,1 wächst, steigt die Anzahl der Patente um etwa zwei Prozent.

Um diese Rechenregeln zu veranschaulichen, wählt Burhop das Beispiel eines Forschers, der 50000 Euro in Form von 40000 Euro Grundgehalt und 10000 Euro Bonus verdient: „Bislang erfindet der jedes Jahr 1000 Patente. Bei ihm würde eine einprozentige Erhöhung seines Gesamtgehältes von 50000 Euro auf 50500 Euro dazu führen, dass seine Erfindungsleistung



auf 994 Patente sinkt, wenn er nur ein höheres Grundgehalt bekommt.“ Anders sieht es aus, wenn das höhere Gehalt aus einem Bonus stammt. „Bei dieser Variante steigt der Anteil der Boni am Gesamteinkommen von 20 auf 20,8 Prozent, also um den Faktor 1,04.“ Damit erhöht sich die Zahl der Patente um acht.

WAS DIE ZECHENBARONE MUNTER MACHTE

„Dieser Bonuseffekt von acht Patenten gleicht den Effekt des höheren Gesamteinkommen – sechs Patente minus – mehr als aus. Insgesamt steigt also die Zahl der Patente von 1000 auf 1002.“ So gesehen sei zwar ein Effekt von Boni auf patentierbare Erfindungen festzustellen, doch sei dieser „sehr klein und auch erst nach einigen Jahren sichtbar“.

Zu ähnlichen Ergebnissen kamen die beiden Bonner Ökonomen auch, als sie sich die Geschäftsdaten von Zechen aus dem Ruhrgebiet im 20. Jahrhundert vornahmen und die Wirkung von Bonuszahlungen an die geschäftsführenden Direktoren untersuchten. Die waren in Aktienunternehmen schon seit der Mitte des 19. Jahrhunderts üblich.

Außer über die Boni hatten die Besitzer während der Gründerzeit sogar kaum Möglichkeiten, die Arbeit der Direktoren in ihrem Sinne zu beeinflussen.

Burhop und Lübbers interessierten sich speziell für die in einem Syndikat verbundenen Minen. Solche Verbände genießen unter Ökonomen keinen guten Ruf. „Kartelle fördern die Faulheit“, fasst Carsten Burhop eine Theorie zusammen, wie sie der Wirtschaftsnobelpreisträger Sir John Richard Hicks nach seinen Studien an Syndikaten im Allgemeinen formuliert hat: Der größte Profit durch ein Monopol ist ein geruhames Leben für die Manager.

Die Bonner Forscher machten sich daran, diese Theorie am Beispiel von 28 Bergwerksunternehmen aus dem Ruhrgebiet zu überprüfen. „Das von einigen dieser Firmen gebildete Kartell minimierte den Wettbewerbsdruck und führte zu Beständigkeit der Preise und Produktion“, sagt er und nennt damit die ökonomischen Vorteile, die sich für die Zechenbarone aus dieser Förderturmpolitik ergaben.

Um die Faulheitstheorie zu überprüfen, schätzten die beiden Forscher mit einem mathematischen Modell, wie hoch die Produktion bei einem gegebenen Einsatz im Idealfall liegen

kann – für Zechen, die den Kräften des Marktes voll ausgesetzt waren, für Bergwerke in einem Syndikat, und das Ganze noch einmal für Unternehmen, die Boni zahlten. Dabei werteten sie die Anzahl der Arbeiter und den Wert der verwendeten Maschinen und Anlagen als Einsatzfaktoren und setzten sie mit der Jahresmenge geförderter Kohle als Produktionsergebnis in Beziehung.

Das Ergebnis überraschte die beiden dann schon. Denn offenbar trifft Hicks' Feststellung nicht zwangsläufig auf jedes Syndikat zu. „Es zeigte sich, dass die Effizienz der Bergbau-Unternehmen nicht signifikant durch die Mitgliedschaft im Kartell beeinflusst wurde“, so Burhop. Doch noch interessanter fand er eine andere Beobachtung: „Die Effizienz war deutlich höher in jenen Betrieben, die hohe Boni an ihre Direktoren zahlten.“ Durchschnittlich entrichteten die Zechen 77300 Mark an Bonuszahlungen an das Direktorium. „Nur so zum Vergleich: Ein Arbeiter hat damals im Jahr 1000 Mark verdient“, erklärt Burhop.

Unterm Strich stellten Burhop und Lübbers fest, dass auch hier wieder ein Prozent mehr Bonus schon genügt, um etwas zu verändern. So reduzierten sich Reibungsverluste in der Produkti-



on um 0,0035 Prozent – einfach nur durch ökonomischeren Einsatz der Produktionsmittel und besseres Management. Bei 22,66 Millionen Mark, die einem durchschnittlichen Betrieb damals aufgrund von Effizienz-Verlusten entgingen, macht das 790 Mark Ersparnis aus. Dafür mussten die Aktionäre aber 773 Mark zusätzlichen Bonus an ihre Direktoren zahlen, ihnen blieben also nur 17 Mark. Insofern brachte es den Besitzern der Minen offenbar nicht viel, ihr Prinzipal-Agent-Problem mit den angestellten Direktoren über Bonuszahlungen anzugehen. „Volkswirtschaftlich bringt das natürlich schon was, wenn die Effizienz gesteigert wird“, sagt Burhop: „Aber das bezweckten die Minenbesitzer mit den Bonuszahlungen natürlich nicht.“

Das Beispiel der Kohleminen im Ruhrgebiet zeigt, dass Boni wirken können. Allerdings ist ihr Effekt nur gering und hängt stark von dem vorgegebenen Ziel ab. „Das Problem ist nicht die Idee als solche, sondern dass sie die Arbeitsanstrengungen in eine Richtung lenkt“, so Burhop. Daher spricht er sich auch gegen ein generelles Verbot von Boni aus. Damit würde man der Wirtschaft eher schaden. Doch eine falsche Zielvorgabe kann zur Kehrseite der Verdienstmedaille werden. Die gegenwärtige Finanzkrise

sei ein Beispiel für die fatalen Folgen einseitiger Fokussierung. „Wenn ich einen Bonus bekomme, der sich vom Gewinn dieses Jahres ableitet, interessiert mich der vom nächsten Jahr nicht mehr“, sagt Burhop. Die Banker sind so motiviert worden und verzockten große Vermögen, weil sie kurzfristigen Aktiengewinn im Sinn hatten.

KRISENMODELL AUS DER KAISERZEIT

Wenn sie an derartige Zielvorgaben geknüpft sind, gehen von Bonifikationen tatsächlich Risiken aus. Daher ist eine stärkere Kontrolle, wie sie von Politikern und Kommentatoren des Wirtschaftsgeschehens eingefordert wird, aus Sicht des geschichtsbewanderten Ökonomen durchaus angebracht. Möglicherweise lassen sich die Interessen von Unternehmenseignern mit Transparenz und Kontrolle sogar effektiver umsetzen als mit Boni und sonstigen Anreizen – zumindest in der Vergangenheit war das so, wie die Forschung von Carsten Burhop und Thorsten Lübbens zeigt. Dem Wirtschaftsboom der Gründerzeit folgte 1873 nämlich eine schwere Krise. Darauf reagierte die Regierung nach langen Debatten, indem sie 1884 das Aktienrecht reformierte und Regeln, Kontrolle sowie

Strafen verschärfte. Bis dato hatten zur Hauptversammlung nur Großaktionäre Zutritt und entschieden über die Belange des Unternehmens, Kontrolle über den Erfolg der Vorstände gab es kaum, und unfähige Bosse loszuwerden war langwierig und aufwendig.

Nach der Reform durften alle Aktionäre an den Hauptversammlungen teilnehmen, hatten dort auch ein Stimmrecht und wurden durch eine Gewinn- und Verlustrechnung über den Unternehmenserfolg informiert. Die neuen Regeln erleichterten es zudem, Vorstände zu entlassen. Das führte dazu, dass diese sich auch ohne Zulagen Mühe geben mussten. Die monetären Anreize für die Vorstände konnten nahezu halbiert werden.

Später wurden zwar weitergehende Regeln erlassen – beispielsweise eine Sondersteuer auf Tantiemen – aber an dem Erfolg der bereits 1884 erlassenen Regeln besteht kein Zweifel. Als Grundlagenforscher hält es der Bonner Ökonom zwar nicht für seine Aufgabe, Handlungsempfehlungen für aktuelle Probleme zu liefern. Doch er hat durchaus nichts dagegen, wenn seine Erkenntnisse in die Debatte einfließen, welche Maßnahmen Wirtschaftsführer disziplinieren könnten. „Denn was im Kaiserreich funktioniert hat, könnte ja auch heutzutage klappen.“ ◀

F&L denker

aufgeschlossen

Die auflagenstärkste hochschul- und
wissenschaftspolitische Zeitschrift Deutschlands.
Leseprobe unter: www.forschung-und-lehre.de
oder per Fax 02 28 902 66-90

**Forschung
& Lehre**

ALLES WAS DIE WISSENSCHAFT BEWEGT

Schwitzen

im Dienst der Wissenschaft

Ein Waschbrettbauch braucht Disziplin – und einen guten Trainingsplan. Wie sich Muskeln optimal aufbauen lassen, hat **Erich Albert Müller** am **Max-Planck-Institut für Arbeitsphysiologie** untersucht. Heute, mehr als 50 Jahre später, sind die von ihm beschriebenen Grundprinzipien noch immer aktuell – so wie viele Erkenntnisse aus der arbeitsphysiologischen Forschung von damals.

TEXT **ELKE MAIER**

Nach einer halben Flasche Schnaps und zwei Litern Bier Fahrrad fahren – was im Straßenverkehr empfindliche Strafen nach sich zieht, wurde am Kaiser-Wilhelm-Institut für Arbeitsphysiologie sogar entlohnt. Denn die Wissenschaftler wollten herausfinden, wie sich Alkohol auf die Arbeitsleistung von Schwerarbeitern auswirkt. Dazu hatten sie eine Testperson angestellt und zur Ergometerarbeit verpflichtet: In einem Langzeitversuch über sechs Monate „wurden an den Alkoholtagen ½ l Münsterländer Korn und 4 Flaschen Dortmunder Bier (à 0,5 l) getrunken“.

Laut Protokoll durfte sich der Proband manchmal am Versuchstag selbst, zeitweise schon am Vorabend des Experiments betrinken: „Wir sehen in unseren Versuchen, dass die Katerwirkung einen quantitativ stärkeren und eindrucksvolleren Ausschlag der Leistungskurve bedingt als die unmittelbare Alkoholwirkung“, interpretierten die Wissenschaftler die absinkende Arbeitsleistung der Testperson. Hingegen wirkte sich dieselbe Alkoholmenge positiv aus, wenn sie kurz vor Arbeitsbeginn genossen wurde. Fazit: „Je weniger die Arbeit ‚als Last‘ empfunden wird, umso intensiver und frischer ist der Arbeitswille der Versuchsperson.“ Die Versuche sollten den Alkohol aber nicht als Mittel zur Leistungssteigerung empfehlen, sondern die Auswirkungen des Alkoholkonsums beschreiben, der unter Schwerarbeitern – und nicht nur unter diesen – zumindest früher weit verbreitet war.

Doch die Forscher am Kaiser-Wilhelm-Institut für Arbeitsphysiologie widmeten sich längst nicht nur der Wirkung von Rauschmitteln – vielmehr hatte sich das 1912 gegründete Institut der „wissenschaftlichen Erforschung der Physiologie, Pathologie und Hygiene der geistigen und körperlichen Arbeit“ verschrieben und wollte daher möglichst viele Aspekte beleuchten.

Muskeltraining, das Wirkung zeigt: Erich Albert Müller mit einer seiner Versuchspersonen am Kaiser-Wilhelm-Institut für Arbeitsphysiologie.



Im Jahr 1929 zog das Institut von Berlin nach Dortmund um und damit direkt ins Zentrum harter Arbeit – ins Ruhrgebiet. In den Bergwerksstollen der Zechen und an den glühenden Hochöfen der Stahlwerke zwischen Rhein und Ruhr fanden die Physiologen genau die Bedingungen vor, für die sie sich so brennend interessierten: Wie beeinflusst körperliche Arbeit die Gesundheit? Welche Nährstoffe braucht der Körper, um große physische Belastung auszuhalten? Um Fragen wie diese zu beantworten, entwickelten die Wissenschaftler eine Reihe ausgefallener Versuchsanordnungen.

DIE ULTIMATIVE BODYBUILDING-FORMEL

So erforschten sie die Staub filternden Eigenschaften der menschlichen Nase und bliesen Testpersonen zu diesem Zweck Staub ins Riechorgan. Dabei fanden sie einen Zusammenhang zwischen Staubbindung in der Nase und der Silikose (Staublung): „Es ergibt sich, daß bei Bergleuten mit schlecht filternden Nasen silikotische Veränderungen eher auftreten und schwerere Grade erreichen als bei Bergleuten mit gut filternden Nasen (...)“

In einem anderen Versuch steckten die Forscher einen Probanden in eine Klimakammer und ließen ihn im Dienst der Wissenschaft Fahrrad fahren – diesmal mehrere Stunden lang bei Temperaturen bis zu 46 Grad Celsius, mit und ohne Getränk. Gewissenhaft sammelte man den abgegebenen Schweiß, um die darin enthaltene Chlormenge zu bestimmen. Vor und nach dem Experiment stellten die Forscher den jungen Mann auf die Waage, um die abgegebene Schweißmenge zu ermitteln. Auf diese Weise wollten sie herausfinden, wie sich Schwerarbeit unter Hitze auf den Mineralstoffwechsel und die Leistungsfähigkeit des Körpers auswirkt.

Dagegen erschienen die Experimente, die Erich Albert Müller als Abteilungsleiter am Dortmunder Institut einführte, als vergleichsweise trockene Muskelarbeit. Er entdeckte die ultimative Bodybuilding-Formel zusammen mit seinem Kollegen Theodor Hettinger in den 1950er-Jahren – das Kaiser-Wilhelm-Institut hieß inzwischen Max-Planck-Institut für Arbeitsphysiologie. Die beiden untersuchten die Zusammenhänge zwischen Trainingsreiz und Muskelkraft bei untrainierten Testpersonen beiderlei Geschlechts: „Wir fanden, daß Kontraktionen mit weniger als etwa 1/3 der Maximalkraft den Muskel nicht trainieren. Über-

schreitet die Kontraktion eines Muskels $\frac{1}{3}$ der Maximalkraft, so wächst seine Masse und damit auch seine Kraft", schrieb Müller.

Das Überraschende dabei: Die Kraft wuchs schon dann mit maximaler Geschwindigkeit, wenn der Muskel nur mit halber Maximalkraft kontrahiert wurde. Außerdem reichte schon eine einzige Kontraktion von nur einer Sekunde Dauer am Tag aus, um den größtmöglichen Kraftzuwachs zu erzielen. Wenngleich diese Werte später korrigiert wurden – heute geht man davon aus, dass der Muskel im Idealfall etwa fünf Mal am Tag für jeweils fünf Sekunden mit 70 Prozent der Maximalkraft kontrahiert werden sollte –, so gelten die Grundprinzipien noch immer: Um beim Krafttraining mit minimalem Aufwand eine maximale Wirkung zu erzielen, gilt es, Intensität, Dauer und Häufigkeit der Belastung richtig zu dosieren.

Doch nicht nur die Industriearbeit interessierte die Forscher: Eine Arbeitsgruppe widmete sich dem Energieverbrauch beim häufigsten aller Berufe – der Hausfrauenarbeit. Für ihre Studie stellten die Wissenschaftler drei Dortmunder Hausfrauen mit Gesichtsmasken und Respirations-Gasuhren aus und beobachteten sie bei ihren täglichen Verrichtungen. Akribisch listeten sie alles auf, ob Strümpfe stopfen, Butterbrot schmieren, Wäsche mangeln oder Fußboden bohren. Aus dem Sauerstoffverbrauch errechneten sie den Energieaufwand und gaben Empfehlungen, wie die Hausarbeit rationeller gestaltet werden könnte – etwa durch die „allgemeine Einführung zeit- und calorien sparender Haushaltsmaschinen“.

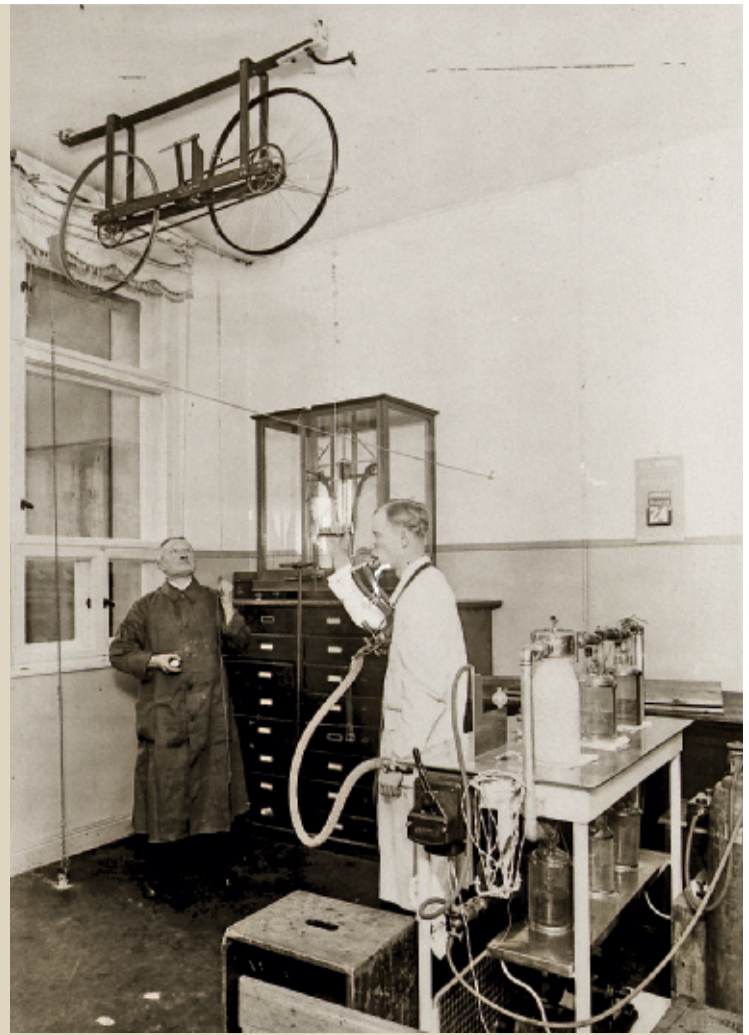
DORTMUNDER ZEITUNG VOM 22. OKTOBER 1929



Viele Spezialabteilungen mit erstklassigen Spezialforschern müssen von den verschiedensten Richtungen her [am Kaiser-Wilhelm-Institut für Arbeitsphysiologie] das gleiche Ziel verfolgen: dem Menschen sein Arbeitslos dadurch zu erleichtern, daß der jeweilige Arbeitsprozeß so gestaltet wird, wie er für den Menschen und seine Arbeit am günstigsten ist.

Neben dem Haushalt bot die Landwirtschaft ein weiteres Forschungsfeld – speziell die Frage, wie sich das Gehen auf verschiedenen Ackerböden auf den Energiebedarf des Landarbeiters auswirkt. Nicht minder spannend schien den Wissenschaftlern die Suche nach der arbeitsphysiologisch günstigsten Korbform beim Kartoffellegen. Das Ergebnis: Beim Gang über einen stoppeligen Acker oder in der Kartoffelfurche verbrennt der Arbeiter 70 Prozent mehr Kalorien als auf glattem Boden. Und: Nierenförmige Körbe mit Tragegurt eignen sich besser als ovale mit Griff, weil sie sich besser der Körperoberfläche anlegen und die statische Haltearbeit verringern.

Erich Albert Müller ging 1966 in Ruhestand und ließ sich in Freiburg nieder, forschte jedoch mit ungebrochenem Elan weiter. In seinem selbst gebauten Labor tüftelte er an der Verbesserung von



Rollentausch: Erich Albert Müller diesmal selbst als Proband in einem Versuch zur „Energetik der senkrecht-abwärts gerichteten Zugbewegung“. Das Foto stammt aus seiner Habilitationsschrift von 1930.

Ergometern und führte seine Studien zum Muskeltraining fort. Als er 1977 starb, hinterließ er mehr als 300 wissenschaftliche Publikationen, darunter wichtige Grundlagen für die Ergonomie.

Bekannt wurde Müller vor allem mit seiner Definition eines Leistungspulsindex, der angibt, wo die individuelle Grenze der Dauerleistungsfähigkeit liegt. Diese Puls-Dauerleistungsgrenze inspirierte den renommierten Sportmediziner Wildor Hollmann, analog dazu 1959 eine Sauerstoff-Dauerleistungsgrenze und somit die Laktatmessung einzuführen – heute sowohl im Leistungssport als auch für viele Freizeitsportler beim Training unverzichtbar.

Sein technisches Geschick hatte Müller nicht nur darauf beschränkt, nützliche Dinge wie Ergometer, Pulszählgerät und Respirations-Gasuhr weiterzuentwickeln – schon früher, noch zu Dortmunder Zeiten, hatte er mit einer gleichermaßen originellen wie ausgeklügelten Technik so manchem seiner Mitmenschen einen unvergesslichen Empfang bereitet: Klingelte der Besucher an der Haustür, öffnete sich diese wie von Geisterhand und eine bewegliche Treppenstufe beförderte den erstaunten Gast automatisch durch die Tür.

Grundsätzlich jedoch plädierte der Hausherr fürs Treppensteigen: „Um den Körper als Energiemaschine auf normaler Leistungshöhe zu erhalten, genügen die eigenen vier Wände (...) Um Herz und Kreislauf leistungsfähig zu erhalten, ist es allerdings zusehends notwendig, alle zwei bis drei Tage zehn Sekunden lang so schnell wie möglich eine Treppe hinaufzulaufen.“ ◀

Argumente für Antworten

Zentrum Neue Technologien

Ab 20. November 2009

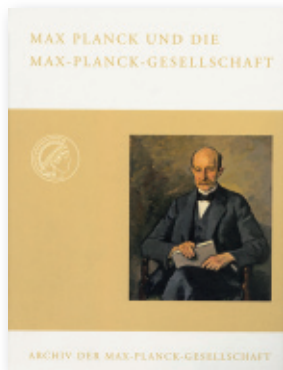
Dauerausstellung Nano- und Biotechnologie
Sonderausstellungen
Neue Materialien und Robotik
Besucher- und Forscherlabor
Präsentationen der Partner

Deutsches Museum



Museumsinsel 1, München · Tel. 089 / 2179-1 · täglich 9–17 Uhr · www.deutsches-museum.de

Partner: Amgen GmbH · BMBF · Helmholtz-Gemeinschaft · Max-Planck-Gesellschaft · Fraunhofer-Gesellschaft



Alles über Planck

Archiv der Max-Planck-Gesellschaft (Hg.): **Max Planck und die Max-Planck-Gesellschaft**, zum 150. Geburtstag am 23. April 2008 aus den Quellen zusammengestellt.

Veröffentlichungen aus dem Archiv der Max-Planck-Gesellschaft, Band 20. In Einzelexemplaren kostenlos beim Archiv der Max-Planck-Gesellschaft, Boltzmannstr. 14, 14195 Berlin, zu beziehen.

Der Band ist als Beitrag des Berliner Archivs der Max-Planck-Gesellschaft zu den Planck-Feierlichkeiten im Jahr 2008 erschienen. Neben drei Überblicksbeiträgen gibt er auf 250 Seiten Dokumente, Bilder und wichtige zeitgenössische Pressestimmen wieder.

An dem Buch hat das gesamte Team des Archivs mitgearbeitet: Aus der Feder von Archiv-Direktor Lorenz Friedrich Beck stammt ein Beitrag über Max Planck im Kaiserreich und in der Weimarer Republik, Alt-Direktor Eckart Henning hat über den Forscher im Dritten Reich geschrieben, Dieter Hoffmann vom Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte über den Physiker Planck. Marion Kazemi, die dienstälteste Mitarbeiterin am Berliner Archiv, hat die Dokumente ausgewählt und eine Zeittafel erstellt, Susanne Uebele die Bilder und Gemälde, die Planck zeigen, zusammengestellt. Interessante Presseartikel – vor allem aus der Zeit zwischen 1930 und 1937 – hat Bernd Hoffmann ausgewählt.

Der Archivar Dirk Ullmann hat aus den vielen Reden und Vorträgen Plancks 100 wichtige Zitate herausgesucht, Nadja Echewitsch die wichtigsten Publikationen von und über Planck aufgelistet und Simone Pelzer ein Interview mit der letzten Haushälterin der Plancks in Berlin tran-

skribiert. Dem Buch liegt eine CD mit einer Selbstdarstellung Plancks aus dem Jahr 1942 bei. Dieses Tondokument wiederum ist Teil einer umfangreicheren CD, die im Supposé-Verlag veröffentlicht worden war.

Unter den Zeitungsausschnitten ist einer mit verblüffender Aktualität: Unter der Überschrift „Der Unfug der Altersgrenze (...) – Raubbau am deutschen Hochschulwesen“ beschwert sich der Journalist Felix Hirsch im Jahr 1926 über die Verschwendung wissenschaftlichen Potenzials durch die Altersgrenze für Professoren, die damals in Preußen bei 68 Jahren lag. Hauptbeispiel für die Verschwendung: Max Planck, der mit Bild dargestellt ist und in diesem Jahr an der Universität emeritiert wurde.

Auch die Ausschnitte über den Konflikt um die Nachfolge Harnacks beleuchten ein wenig bekanntes Kapitel der Geschichte der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft: Danach war ursprünglich geplant, dass der parteilose preußische Kultusminister und Orientalist Carl Heinrich Becker der Nachfolger Harnacks als Präsident der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft werden sollte, aber von einem großen Teil des Senats angeblich als „politisch zu stark engagiert“ abgelehnt worden ist.

Für Planck-Interessierte ist das Buch sicher ein Muss. „Guter Geist ist trocken“ – dieser Spruch, eigentlich ein Motto des Soziologen Niklas Luhmann, fällt einem ein, wenn man die Zitate von Planck liest. Vielleicht ist es einfach der Duktus der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts, der heute etwas betulich und nüchtern wirkt. Vielleicht ist es aber auch der vorsichtige und klare Charakter Plancks, der hier zum Tragen kommt, während man heute meist viel pointierter oder auch ironischer redet und schreibt.

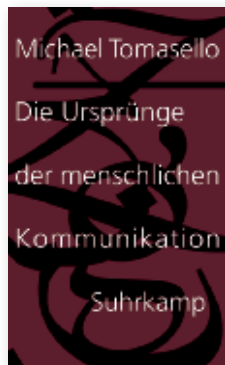
Die in dem Buch zusammengestellten Zitate geben insofern in mehrfacher Hinsicht einen Einblick in die vergangene Welt und Zeit Max Plancks – zwei seien hier wiedergegeben. Gottfried Plehn

*

„... wer es so weit gebracht hat, daß er sich über nichts mehr wundert, der zeigt damit nur, daß er verlernt hat, gründlich nachzudenken.“ (1941)

*

„Eine neue wissenschaftliche Wahrheit pflegt sich nicht in der Weise durchzusetzen, daß ihre Gegner überzeugt werden und sich als belehrt erklären, sondern vielmehr dadurch, daß die Gegner allmählich aussterben und daß die heranwachsende Generation von vornherein mit der Wahrheit vertraut gemacht wird.“ (1948)



Mit Gestik ist schon viel gesagt

Michael Tomasello, **Die Ursprünge der menschlichen Kommunikation**

409 Seiten, Suhrkamp-Verlag, Frankfurt am Main 2009, 39,80 Euro

Ein kleiner Schimpanse will auf den Rücken seiner Mutter klettern. Er berührt leicht ihren Rücken. Die Schimpansin versteht die Aufforderung „Trage mich“ und lässt ihr Junges aufsteigen. Ein einjähriger Junge hört das Geräusch eines Flugzeugs, das er nicht sieht, zeigt in die Richtung, aus der das Geräusch kommt, und sucht begeistert den Blickkontakt seiner Mutter. Obwohl er noch nicht sprechen kann, ist seine Aussage klar: „Ist das nicht toll?“ In einem Käseladen in Italien verlangt ein Deutscher *parmigiano*. Der Inhaber fragt nach – auf Italienisch: Doch der Deutsche versteht nicht. Da er das korrekte Wort nicht kennt, reibt er seine Finger aneinander, so als wolle er Käse über seine Nudeln streuen. Kurz darauf wird ihm Parmesan über die Ladentheke gereicht.

Kaum etwas ist so facettenreich wie Gestik und Mimik. In ihnen – und nicht in tierischen Lauten – liegt das Geheimnis der Sprache begründet. Davon ist Michael Tomasello vom Leipziger Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie überzeugt. In seinem neuen Buch *Die Ursprünge der menschlichen Kommunikation* begibt sich der Hegel-Preisträger 2009 auf die Fährte nach dem entscheidenden Schritt in der Evolution – dem *missing link*, der zu erklären vermag, warum Menschen sprechen, Affen jedoch nicht. Spekulationen darüber gibt

es viele. Gestützt auf Theorien der Sprachphilosophie, Affen- und Säuglingsbeobachtungen sowie vielen Beispielen aus dem menschlichen Alltag entwirft Tomasello jedoch Schritt für Schritt ein raffiniertes Modell der Sprachentwicklung: das Kooperationsmodell der Kommunikation.

Wer dabei ein Werk über die Gemeinsamkeiten von Mensch und Affe erwartet – getreu einem Gedicht von Erich Kästner über „Die Entwicklung der Menschheit“ („Doch ... bei Lichte betrachtet sind sie im Grund noch immer die alten Affen“) –, wird enttäuscht sein. Tomasello interessiert vor allem die kleinen, feinen Unterschiede, die er – wie ein Chirurg am Operationstisch – langsam offenlegt. Ausgehend vom Repertoire von Lauten, über das Menschenaffen verfügen, analysiert er Rufe und gestische Signale unter Affen. Während ihre Laute oft sehr starr sind, haben Menschenaffen eine ausgeprägte Gestik, die sie auch flexibel in unterschiedlichen Situationen einsetzen. Dabei können sie offenbar die Absichten des Gegenübers verstehen.

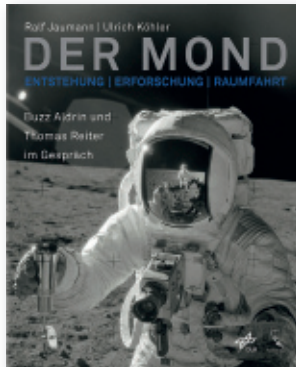
Säuglinge verfügen bereits nach etwa neun Monaten – noch bevor sie ein einziges Wort sprechen – über Fähigkeiten, gestisch zu kommunizieren, die weit über reines „Auffordern“ hinausgehen, das bei Menschenaffen üblich ist. Sie zeigen erste Anzeichen kooperativer Kommunikation,

indem sie helfen und teilen. Gestische Informationen dienen dazu, gemeinsam ein Ziel zu erreichen, oder Tatsachen einfach nur mitzuteilen. Dabei versuchen sie beharrlich, gemeinsame Aufmerksamkeit und Interesse herzustellen.

Erwachsene gehen noch einen Schritt weiter: In ihrer ikonischen Gestik, die ohne Sprache auskommt, simulieren sie Handlungen – wie etwa das Reiben von Käse. Diese Gestik funktioniert ganz anders als beispielsweise die Zeigegesten von Kleinkindern. Sie hängen von den Fähigkeiten ab, zu imitieren, zu simulieren und bestimmte Handlungen in Symbole zu übersetzen. Dies wird vor allem bei Reisen in fremde Länder deutlich, wo beide Seiten kein einziges Wort der Sprache des anderen verstehen: Mit Gestik ist schon viel gesagt – mit Worten ohne Gestik hingegen kann sich niemand verständlich machen.

Tomasellos Buch ist eine Reise in die menschliche Vergangenheit. Es wird denjenigen nicht gefallen, die das Verbindende suchen zwischen Menschen und Affen, für die Menschen nichts anderes sind als die „noch immer alten Affen“. Es ist eine analytische Abhandlung, manchmal ein bisschen sperrig zu lesen, aber Inspiration für alle, die sich gerne Gedanken machen, über die Sprache und die Entstehung von Kultur.

Barbara Abrell



Der Mond riecht nach Holzkohle

Ralf Jaumann/Ulrich Köhler, **Der Mond**, Entstehung – Erforschung – Raumfahrt

320 Seiten, zahlreiche Abbildungen, Fackelträger Verlag, Köln 2009, 49,95 Euro

Der Mond scheint uns ebenso vertraut wie fremdartig. Er ist ein geschichtsträchtiges Forschungsobjekt – und doch stets aktuell. Erst vor wenigen Wochen schlugen zwei Geschosse in dem Krater Cabeus ein: die Oberstufe einer *Centaur*-Rakete und die Sonde *LCROSS* (Lunar CRater Observation and Sensing Satellite). Der Crash sollte dem Ziel dienen, im Auswurfmaterial Wasser nachzuweisen und damit eine strittige Frage zu beantworten: Gibt es auf der scheinbar staubtrockenen, kraterzerfurchten Gesteinskugel nicht doch irgendwo Eis?

Es mag erstaunen, dass der Mond noch immer wissenschaftliche Rätsel aufgibt. Schließlich setzte am 20. Juli 1969 (MEZ) die Landefähre *Eagle* sanft im Mare Tranquillitatis auf und betreten Neil Armstrong und Buzz Aldrin als erste Menschen einen fremden Himmelskörper. Wie es damals war, erfahren die Leser des vorliegenden Buchs gleich zu Beginn aus erster Hand: Buzz Aldrin gibt bereitwillig Auskunft – in einem Interview, das der deutsche Rekordastronaut Thomas Reiter mit ihm geführt hat. Darin erfährt man unter anderem, dass die Außenhaut der Landefähre so dünn war wie ein Löschblatt oder dass der Mond nach Holzkohle riecht.

Das Interview behandelt spannende Themen, setzt allerdings ein Wissen voraus, das der Laie noch nicht haben kann.

Nicht zuletzt deswegen macht der Einstieg beim interessierten Leser Lust auf mehr. Und das bekommt er auf den folgenden 200 Seiten reichlich geboten: Die Autoren Ralf Jaumann und Ulrich Köhler, Wissenschaftler am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), hatten entweder einen hervorragenden Lektor oder sie sind journalistische Naturtalente. Jedenfalls beleuchten sie alle Facetten der Mondforschung so lebendig, so spannend und im besten Sinne populärwissenschaftlich, dass man das Buch nur ungern aus der Hand legen möchte. Dazu kommen die vielen, teils großformatigen Fotos, die eine sauber arbeitende Bildredaktion sorgfältig zusammengestellt hat. Ein Glossar erklärt wichtige Fachbegriffe von „Akkretion“ bis „Zentralberg“ und wird so zu einem kleinen geologischen Lexikon. Ein umfangreiches Register erleichtert die gezielte Suche.

Natürlich steht im ersten Teil der viel zitierte „Wettlauf zum Mond“ im Vordergrund, der mit einem Rennen der unbemannten Raumsonden beginnt. Nach der legendären Rede von Präsident John F. Kennedy vor dem amerikanischen Kongress am 25. Mai 1961 mit der Ankündigung, „noch vor Ende des Jahrzehnts einen Menschen auf dem Mond zu landen und ihn sicher zur Erde zurückzubringen“, starten die USA mit dem Projekt *Apollo* jedoch

eine einzigartige Offensive, die in dem „Spaziergang“ von Armstrong und Aldrin gipfelt und noch zehn weitere Astronauten zum Erdbegleiter bringt.

Jaumann und Köhler schildern alle Missionen detailliert und stellen auch die wissenschaftlichen Aspekte gebührend dar. Doch, so lautet eine Kapitelüberschrift, „Apollo war erst der Anfang der Mondforschung“. So berichten die Autoren über den vermeintlichen Ursprung des Trabanten – er entstammt wohl der Kollision eines marsgroßen Protoplaneten mit der jungen Erde – und betonen, dass eben diese gemeinsamen Wurzeln den Mond als Objekt der weiteren Erkundung prädestinieren.

Tatsächlich ist der Himmelskörper in den vergangenen Jahren wieder in den Fokus der Forschung gerückt – wenngleich aus den Rückkehrplänen amerikanischer Astronauten in den kommenden Jahren wohl nichts wird und es bis zur nächsten spektakulären bemannten Mission deutlich länger dauert, als es der US-Raumfahrtbehörde NASA lieb ist: Der Mond, so schreiben die Autoren, „ist für die Zeit nach der Raumstation das nächste logische Betätigungsfeld der Menschen im Welt- raum“. Selbst wer solchen Plänen eher skeptisch gegenübersteht, wird nach der Lektüre dieses erhellenden Buchs wenig Gegenargumente finden. Helmut Hornung



Spiegeleier auf der Venus

Thomas Bührke, **Warum Planeten keine Würfel sind**
... und andere astronomische Geheimnisse

159 Seiten, Herder Verlag, Freiburg 2009, 29 Euro

Warum sind Planeten keine Würfel? Wie dick ist der dickste Stern? Sind schwarze Löcher hohl? Wo wohnt eigentlich ET?

Diese Fragen mögen auf den ersten Blick ein wenig seltsam klingen. Aber kennen Sie die Antworten? Schon immer umgibt die Objekte, mit denen die Astronomen in ihrem Alltag „hantieren“, die Aura von etwas Unvorstellbarem, Entrücktem, Rätselhaftem. Der Astrophysiker und Wissenschaftsjournalist Thomas Bührke, Autor auch dieses Magazins, weiß, was Laien wissen wollen – und versteht sich auf verständliche Antworten.

So ist sein neuestes Buch eine komprimierte, gut lesbare und pfiffige Einführung in die Wissenschaft vom Weltall geworden. Die eingangs zitierten Fragen – und noch

fast ein halbes Dutzend mehr – nimmt der Autor zum Anlass, um das ganze Spektrum astronomischer Forschung vorzustellen. Der Leser erfährt etwa, wie die Erde entstand („aus Zigarettenrauch“, wie Bührke schreibt), und lernt auf einer Reise durch das Sonnensystem die Planeten kennen, zum Beispiel die Venus, auf der man ohne Weiteres Spiegeleier braten könnte.

Dem klassischen hierarchischen Aufbau des Universums folgend, tastet sich der Autor Schritt für Schritt aus dem Vorgarten der Sonne hinaus in die Tiefen des Universums. Er beschreibt die enorme Vielfalt der Sterne und deren Lebensläufe, unsere Milchstraße und ferne Galaxien und landet schließlich beim Urknall – jenem geheimnisvollen Moment vor mehr

als 13 Milliarden Jahren, wo aus nichts plötzlich alles wurde.

Bührke erklärt viel mit Bildern, wobei er vereinfacht, ohne zu verfälschen. Dem einen oder anderen Begriff, der einen oder anderen Kuriosität widmet er einen kleinen Kasten, so den „Kräften im Universum“, dem „Asteroidenstaub auf dem Bücherregal“ oder der „Antimaterie“.

Und so weiß der Leser am Ende des kleinen Büchleins ganz genau, warum Planeten keine Würfel sind (was hier natürlich nicht verraten wird!), und vieles mehr. Er hat die Antworten im einprägsamen Text nahezu spielerisch gelernt und zudem über die eine oder andere witzige Illustration von Frank Wowra geschmunzelt.

Helmut Hornung

Weitere Empfehlungen

- Sandra und Matthew Blakeslee, **Der Geist im Körper**, Das Ich und sein Raum, 341 Seiten, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2009, 24,95 Euro
- Gunter Dueck, **Abschied vom Homo oeconomicus**, Warum wir eine neue ökonomische Vernunft brauchen, 251 Seiten, Eichborn, Frankfurt am Main 2008, 22,95 Euro
- Felix R. Paturi, **Mathematische Leckerbissen**, Das Buch für Querdenker, 271 Seiten, Patmos, Düsseldorf 2008, 22,90 Euro
- Lee Smolin, **Die Zukunft der Physik**, Probleme der Stringtheorie und wie es weitergeht, 494 Seiten, Deutsche Verlags-Anstalt, München 2009, 24,95 Euro
- J. Craig Venter, **Entschüsselt**, Mein Genom, mein Leben, 569 Seiten, S. Fischer Verlag, Frankfurt am Main 2009, 24,95 Euro

Standorte

- Institut / Forschungsstelle
- Teilinstitut / Außenstelle
- Sonstige Forschungseinrichtungen

Niederlande

- Nimwegen

Italien

- Rom
- Florenz

USA

- Florida

BRASILIEN

- Manaus



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

Impressum

MaxPlanckForschung wird herausgegeben vom Referat für Presse- und Öffentlichkeitsarbeit der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V., vereinsrechtlicher Sitz: Berlin. ISSN 1616-4172

Redaktionsanschrift
Hofgartenstraße 8, 80539 München
Tel.: 089 2108-1562, Fax: 089 2108-1405
E-Mail: mpf@gv.mpg.de
Internet: www.magazin-dt.mpg.de

Verantwortlich für den Inhalt
Dr. Christina Beck (-1276)

Redaktionsleitung
Peter Hergersberg (-1536), Helmut Hornung (-1404)

Redaktion
Dr. Christina Beck (Biologie, Medizin; -1276)
Birgit Fenzel (Kultur & Gesellschaft; -1471)
Peter Hergersberg (Chemie, Physik, Technik; -1536)
Helmut Hornung (Astronomie; -1404)

Assistenz/Bildredaktion
Susanne Schauer (-1562)

Wissenschaftlicher Beirat

Prof. Dr. Gerhard Wegner
Prof. Dr. Heinz Wässle
Prof. Dr. Wolfgang Prinz

Gestaltung

Julia Kessler, Sandra Ostertag
Voßstraße 9, 81543 München
Tel.: 089 27818770
E-Mail: projekte@designergold.de

Litho

kaltnermedia GmbH
Dr.-Robert-Zoller-Str. 1, 86399 Bobingen

Druck & Vertrieb

Vogel Druck- & Medienservice GmbH
Leibnizstr. 5, 97204 Höchberg

Anzeigen

Beatrice Rieck
Vogel Druck- & Medienservice GmbH
Leibnizstr. 5, 97204 Höchberg
Tel.: 0931 4600-2721, Fax: 0931 4600-2145
E-Mail: beatrice_rieck@vogel-druck.de

MaxPlanckForschung will Mitarbeiter und Freunde der **Max-Planck-Gesellschaft** aktuell informieren. Das Heft erscheint in deutscher und englischer Sprache (**MaxPlanckResearch**) jeweils mit vier Ausgaben pro Jahr. Die Auflage dieser Ausgabe beträgt 60000 Exemplare (**MaxPlanckResearch**: 10000 Exemplare). Der Bezug ist kostenlos. **MaxPlanckForschung** wird auf chlorfrei gebleichtem Papier gedruckt. Nachdruck der Texte nur mit Genehmigung der Redaktion gestattet. Bildrechte können nach Rücksprache erteilt werden. Alle in **MaxPlanckForschung** vertretenen Auffassungen und Meinungen können nicht als offizielle Stellungnahme der **Max-Planck-**

Gesellschaft und ihrer Organe interpretiert werden.

Die **Max-Planck-Gesellschaft** zur Förderung der Wissenschaften unterhält 80 Forschungsinstitute, in denen rund 13400 Mitarbeiter tätig sind, davon etwa 4900 Wissenschaftler. Hinzu kamen im Jahr 2008 rund 12100 Stipendiaten, Gastwissenschaftler und Doktoranden. Der Jahresetat 2009 umfasst insgesamt 1,3 Milliarden Euro. Die Forschungsaktivität erstreckt sich überwiegend auf Grundlagenforschung in den Natur- und Geisteswissenschaften. Die **Max-Planck-Gesellschaft** sieht ihre Aufgabe vor allem darin, Schrittmacher der Forschung zu sein. Die **Max-Planck-Gesellschaft** ist eine gemeinnützige Organisation des privaten Rechts in der Form eines eingetragenen Vereins. Ihr zentrales Entscheidungsgremium ist der Senat, in dem Politik, Wissenschaft und sachverständige Öffentlichkeit vertreten sind.

Wir haben geforscht, wo Sie forschen können



- » Einstiegs- und Aufstiegsmöglichkeiten in der Forschung
- » Porträts, Interviews und Ratgebertexte zu Karrierewegen
- » Film ab für die Forschung: DFG Science TV gibt spannende Einblicke in wissenschaftliche Projekte
- » Verdienstmöglichkeiten für Forscher und Entwickler
- » Forschungsförderprogramme im Überblick
- » Aktuelle Stellenanzeigen

www.academics.de/forschung